Electrónica: do Tubo de Vazio aos Futuros Sistemas Electrónicos

Moisés Simões Piedade

RESUMO
Apresenta-se uma breve referência aos mais importantes acontecimentos que marcaram a evolução da Electrónica nos últimos 80 anos. Analisam-se os aspectos condicionantes desta evolução e traça-se qual o perfil do futuro engenheiro electrotécnico, capaz de acompanhar e aproveitar todo o potencial proporcionado pela permanente e rápida evolução tecnológica, nas áreas de projecto, síntese, produção e teste de sistemas electrónicos.

ABSTRACT
A brief reference to the most important electronic advances in the last eighty years is done. The conditioning factors of this evolution are analysed and the future electronic engineer profile are envisaged. He will be able to take advantage of this fast tecnological evolution, in the electronic systems areas of project, synthesis, production and test.

O Instituto Superior Técnico foi fundado cerca de 30 anos após as primeiras experiências sobre a emissão termoiónica de partículas por um filamento aquecido. Estas experiências, realizadas em 1883 por Edison estiveram na base da electrónica dos tubos de vazio. Pouco tempo depois, Thomson, em 1887, caracterizou as partículas emitidas pelo filamento aquecido como sendo electrões e, em 1904, Flemming, introduzindo um eléctrodo adicional (placa) com potencial positivo junto do filamento, realizou o primeiro diodo de vazio.

O diodo de vazio foi o primeiro dispositivo electrónico que permitiu o fluxo unidireccional de electrões entre os seus dois eléctrodos, cátodo (filamento) e ânodo (placa); com este diodo foi realizado o primeiro detector de ondas de rádio.

Lee de Forest originou o tríodo de vazio ao introduzir, em 1906, um eléctrodo adicional entre o cátodo e o ânodo, a grelha de comando, que através da aplicação de uma diferença de potencial em relação ao cátodo permitiu controlar o fluxo de electrões do cátodo para o ânodo.

O tríodo caracterizado por poder amplificar sinais, permitiu a Armstrong, em 1912, a transmissão e recepção de sinais de rádio à distância. Iniciou-se assim a era das telecomunicações.

O Instituto Superior Técnico nasceu praticamente na altura em que se deram os primeiros passos no campo das Telecomunicações e da Electrónica. A Electrónica passa a ser considerada a disciplina da Engenharia Electrotécnica, que estuda os dispositivos electrónicos baseados na emissão termoiónica e os circuitos em que eles são utilizados tendo em vista as várias aplicações.

Durante cerca de 30 anos assistiu-se ao desenvolvimento dos tubos de vazio e à sua aplicação em sistemas, na amplificação de sinais e controlo de potência eléctrica. As características que mais dificultaram a divulgação destes sistemas foram o peso, o volume e a fragilidade, conferida pela utilização dos tubos de vazio.

Em 1948, com o aparecimento do transístor, inicia-se a era dos dispositivos electrónicos semi-condutores que rapidamente tornaram obsoleto o uso das válvulas electrónicas em muitas aplicações.

Todavia, foi em 1960 que se iniciou a verdadeira revolução da indústria electrónica, o início da microelectrónica, com o aparecimento do primeiro circuito integrado monolítico. Este acontecimento abriu o caminho para a realização de circuitos integrados lineares e de circuitos lógicos, começando pelas famílias mais simples e culminando com o aparecimento dos primeiros microprocessadores no início dos anos 70.

A complexidade dos dispositivos electrónicos aumentou extraordinariamente e com ela a complexidade dos sistemas que passou a ser possível implementar.

O microprocessador vulgarizou-se rapidamente pois substitui muitos circuitos lógicos e, pelo facto de ser programável, é facilmente reutilizável em múltiplas aplicações. O microcomputador monolítico, ao incorporar na mesma pastilha de semicondutor um microprocessador, memória do programa, circuitos temporizadores e circuitos, comunicação digital e analógica com o exterior, permitiu um grande avan-

Original recebido para publicação em 26 de Novembro de 1991

ço tecnológico que teve aplicação imediata e generalizada nas indústrias e nos produtos da electrónica de consumo.

Simultaneamente com o desenvolvimento de novos microprocessadores, realizaram-se grandes avanços nos sistemas periféricos de computadores e em ambientes de desenvolvimento de programas. Estes avanços tecnológicos culminaram no desenvolvimento do computador pessoal, cuja aceitação generalizada o tornou num produto da electrónica de consumo.

Nos anos 80 desenvolveu-se um conceito novo de microprocessador - o processador digital de sinal. Este dispositivo, que é uma espécie de processador RISC ("Reduced Instruction Set Computer"), é dotado de uma arquitectura e circuitos internos optimizados para processar sinais digitais em tempo real.

Muitas aplicações da área das telecomunicações, controlo e instrumentação, que exigem o processamento sofisticado de sinais de voz, imagem, ou dados, e que eram tradicionalmente realizados com circuitos analógicos de alta precisão, passam a ser realizadas eficientemente pelos microprocessadores de sinal.

Quase simultaneamente com o aparecimento dos microprocessadores de sinal assiste-se ao desenvolvimento de uma nova técnica de realização de circuitos analógicos de alta precisão em circuito integrado monolítico - os circuitos baseados em condensadores comutados. Filtros de alta selectividade, igualizadores, canceladores adaptativos e sofisticados sistemas de modulação e desmodulação, até então só realizáveis digitalmente, passam a ter uma implementação analógica em circuito integrado monolítico. Esta tecnologia é compatível com a existência de circuitos digitais na mesma pastilha de semicondutor, permitindo assim o melhor aproveitamento das características de ambos os circuitos, analógicos e digitais, de modo a conseguir a melhor concretização possível para um sistema integrado monolítico.

O conceito de sistema monolítico tornou-se mais abrangente com o desenvolvimento recente de microsensores de grandezas físicas e a realização de micromotores que podem ser integrados com os circuitos de controlo e de processamento de sinal na mesma pastilha de semicondutor.

O recente desenvolvimento tecnológico permitiu realizar, na mesma pastilha de semicondutor, dispositivos electrónicos de potência e dispositivos de processamento de sinal, controlo, diagnóstico de estado e protecção do dispositivo de potência. Trata-se do início de uma nova área da electrónica baseada nos dispositivos inteligentes ("Smart-Power Devices") que terá um impacto grande nas aplicações industriais, nos produtos electrónicos de consumo e na indústria automóvel.

A par com a tentativa de integrar o maior número de funções possível numa única pastilha de semicondutor, assiste-se à espectacular miniaturização dos dispositivos, como o comprova o desenvolvimento recente da primeira memória dinâmica, DRAM ("Dynamic Random Access Memory"), de 64 Megabyte, constituída por 140 milhões de dispositivos electrónicos implantados numa pastilha de 10×20 milímetros e consumindo apenas 44 miliwatt.

Com esta rápida evolução da electrónica e com a necessidade de procurar novos mercados, os fabricantes de semicondutores abrem as suas portas à fabricação de circuitos e sistemas específicos provenientes de clientes que projectam o seu circuito usando ferramentas de CAD ("Computer Aided Design"), introduzindo assim o conceito de circuito personalizado pelo cliente.

No campo da produção industrial de sistemas electrónicos as novas tecnologias de montagem superficial e de "chips on board", dotadas de maquinaria automática, permitem atingir uma produtividade e uma fiabilidade excepcionais.

Novas ferramentas de projecto, análise, síntese e teste de sistemas complexos foi necessário desenvolver para responder aos diferentes níveis de abstracção em que o moderno projectista de sistemas electrónicos tem de trabalhar. As ferramentas de CAD, entretanto desenvolvidas, são uma ajuda preciosa, pois permitem automatizar quase completamente o processo de realização de sistemas, desde a sua concepção até à produção.

É este o panorama actual da Electrónica nos anos 90, praticamente 80 anos depois do seu verdadeiro aparecimento e coincidindo com os 80 anos do IST.

Relativamente ao futuro da Engenharia Electrotécnica aquilo que se pode com toda a certeza afirmar é que a previsão mais optimista da evolução será facilmente ultrapassada, dado o elevado ritmo de transformações tecnológicas a que se tem assistido nos últimos anos. Todavia, não restam dúvidas que no futuro, cada vez mais, será a tecnologia a controlar a evolução nas várias áreas da engenharia. O que no passado recente não era realizável por restrições económicas ou tecnológicas, poderá estar rapidamente ao nosso alcance.

Nos sistemas de telecomunicações a digitalização das redes de comunicação e a distribuição de serviços de audio e video será a evolução natural. A implementação económica do videotelefone a 64 Kb/s e a transmissão de video digital de alta qualidade a baixo ritmo são avanços espectáveis apenas dependentes da evolução na área da microelectrónica. Por outro lado, a generalização das comunicações via rádio permitirá o acesso a toda a rede integrada de serviços de telecomunicações, em qualquer lugar que nos encontremos. É pois expectável, o aparecimento de um grande número de equipamentos de telecomunicações.

A indústria automóvel será uma das actividades onde a Electrónica terá um incremento acentuado em vários sectores, podendo pensar-se nas suspensões controladas electronicamente, na redução ao mínimo dos cabos de alimentação, através da inclusão de interruptores electrónicos do tipo "Smart-Power", colocados junto dos dispositivos que controlam, e comunicando através de um canal de endereços com a unidade lógica central. É ainda de esperar que sejam introduzidos sistemas baseados na detecção automática de localização de viatura e em mapas electrónicos de ajuda ao estabelecimento de rotas óptimas e um sem número de automatismos.

Os produtos de electrónica de consumo poderão vir a ser mais interactivos com o utilizador e a apresentar uma sofisticação maior, com a introdução generalizada das técnicas de processamento digital de sinal nestes sistemas.

Inúmeras conjecturas sobre a evolução tecnológica na área da electrónica poderiam ser feitas.

A conclusão a que invariavelmente se chegará é a que a complexidade dos sistemas irá aumentar extraordinariamente, o que criará novos desafios ao engenheiro electrotécnico nas áreas do projecto, síntese, produção e teste de sistemas electrónicos.

Analisando a evolução tecnológica entretanto sofrida, é evidente que o engenheiro electrónico formado hoje deve possuir um perfil diferente do que teria há 10 anos, para ter um horizonte profissional o mais vasto possível na área tecnológica que mais rapidamente está a evoluir.

O IST respondeu a este desafio com a recente criação do novo ramo da licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores denominado "Sistemas Electrónicos e Computadores". Este ramo é caracterizado por uma forte formação de base, vista numa forma dinâmica, evoluindo ao longo do tempo, isto é, aquilo que no passado era formação tecnológica avançada, para a época, poderá vir a ser no futuro, formação de base. O equilíbrio ponderado entre a formação de base clássica, a formação de base dinâmica e a formação tecnológica avançada permitirá formar novos profissionais de engenharia dotados de capacidade de intervenção e de definição do futuro da engenharia electrotécnica em Portugal. Estimulando a criatividade e a inovação procura-se envolver a incipiente indústria electrónica, os serviços e a engenharia electrotécnica em geral para o salto que deve dar para que Portugal não perca as potencialidades que tem no contexto da indústria electrónica internacional.

Agradecimentos

O autor agradece ao Prof. João Freire e à Engª. Teresa Almeida as sugestões e comentários que muito beneficiaram o texto aqui apresentado.

Sobre o Autor

Moisés Simões Piedade é Professor Associado com Agregação do Departamento de Electrotecnia e Computadores, Secção de Electrónica, e Coordenador do novo ramo Sistemas Electrónicos e Computadores da licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

A Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico, através da Secção de Folhas, encontra-se apetrechada a prestar todo o apoio na sua área de reprografia, nomeadamente:

Teses
Fotocópias a preto e branco
Fotocópias a cor
Encadernações (pasta térmica, argolas, pente)
Plastificações
Picotagem
Dobragem
Outros trabalhos de tipografia

Não entregue o material sem nos consultar!

Damos apoio a:

Congressos
Conferências
Simpósios
Seminários
Outras organizações

PREÇOS SEM CONCORRÊNCIA!

Estamos ao seu dispor, na Secção de Folhas, Instituto Superior Técnico, extensão 210 e 211, telefone 8470880.

Secção de Folhas

ASSOCIAÇÃO DOS ESTUDANTES DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Av. Rovisco Pais 1000 Lisboa

Perspectivas da Mineralurgia dos Sistemas Particulados

José Quintino Rogado

RESUMO

É apresentado o estado do conhecimento dos processos que ocorrem nos sistemas particulados, dos quais a Mineralurgia trata. Em consequência o autor sugere as linhas mais significativas de I&D para que se assegurem adequadamente as matérias primas necessárias às novas tecnologias.

ABSTRACT

The state of the art of the processes ocurring in particulate systems treated by the Mineral Processing is presented. Consequently, the author suggests the most relevant lines of R&D in order that the necessary raw materials for the new technologies were adequatly available.

1 Introdução

Como se sabe, a Mineralurgia[1] (Mineral Processing) trata do enriquecimento de determinados minerais, imediatamente à saída das minas. Isto é, tem por objectivo produzir "concentrados" ricos em espécies úteis que são matéria prima de muitas indústrias a juzante. É, assim, um elo necessário da cadeia industrial e, como tal, tem interesse, neste fim de Século, delinear o seu estado de conhecimento e as suas perspectivas de inovação.

2 O Estado do Conhecimento

2.1 Da Natureza e do Conhecimento dos Sistemas Particulados

A mineralurgia utiliza principalmente sistemas particulados. Contudo, os processos que ocorrem nos sistemas particulados (PSP) são processos básicos com numerosas aplicações industriais tais como nos reactores de leito fluidizado, em Pirometalurgia, nas colunas de lixiviação ou na lixiviação dinâmica, em Hidrometalurgia ou ainda no transporte ou bombagem de polpas de vários tipos, etc.

Como é sabido, os sistemas particulados (SP) são sistemas multifásicos onde uma das fases é um fluído (líquido ou gás) e a(s) outra(s) são partículas sólidas. Em Mineralurgia, o fluído mais frequentemente usado é a água.

Trata-se, na realidade, de suspensões instáveis (ou metaestáveis), visto as partículas sólidas da(s) fase(s) sólida(s) terem habitualmente dimensões muito superiores às das partículas que constituem as suspensões relativamente estáveis estudadas pela Física Clássica; além disso, muitas vezes os SP apresentam concentração de sólidos elevada (por exemplo, mais de 50% de sólidos, em volume).

Consequentemente, as partículas sólidas interagem fortemente, quer em resultado de encontros directos, quer por acção transmitida através da própria fase fluída. As eventuais "leis" de interacção, todavia, são desconhecidas. Os escassos modelos que têm sido propostos não são satisfatórios, excepto talvez para os sistemas específicos que permitiram deduzi-las ou para outros casos suficientemente próximos daqueles.

A dinâmica dos SP, assim como, por exemplo, os diversos tipos de difusão e muitos outros fenómenos elementares que neles podem ocorrer, não puderam, até hoje, ser integrados em quadro válido de modelos razoavelmente gerais.

Por outro lado, a química de superfície da interfase sólido/fluído é extremamente complexa, já que a composição química superficial individual das partículas sólidas é imprevisível; além disso, varia de partícula para partícula. Daí que se deva falar em fases sólidas e não de fase sólida e, como se verá, não será esta, a única razão para tanto.

Estas complexidades explicam certo atraso em que se encontra a teoria e as tecnologias de controlo dos processos ocorrendo nos SP, apesar da constante investigação aplicada, desde há décadas realizada, com sistemas fluidizados, muitas vezes, aliás, em escala industrial.

Compreende-se que uma das principais dificuldades operacionais na construção de modelos dos PSP, em Mineralurgia, reside na caracterização das respectivas fases sólidas. Na verdade trata-se de sistemas teoricamente com número muito grande, quiçá ilimitado, de graus de liberdade, não só, pelo que se referiu, quan-

1 Denominada até à década de 60 Preparação de Minérios.

Original recebido para publicação em 30 de Outubro de 1991

to à heterogeneidade química (de superfície ou volúmica), como também quanto à forma e tamanho (calibre) dos componentes sólidos e ainda no que respeita a outras suas propriedades tais como a susceptibilidade magnética, a condutividade eléctrica, e obviamente a densidade.

Há, portanto, que recorrer a funções de distribuição discretas multidimensionais e, pelo menos teoricamente, os observáveis necessários ao controlo exigiriam a instalação de instrumentação capaz de captar em tempo real a composição química, a forma e o calibre, etc, de tais componentes.

Em situações práticas não tem sido possível desenvolver instrumentação capaz de fornecer, em tempo real, as funções de distribuição dos calibres - apenas é possível obter funcional de tal distribuição, o chamado módulo de calibre Kα, grandeza que mede um calibre α-superior ou α-inferior, isto é, tal que α% da população particular em número ou em volume e, por vezes, em peso tem calibre superior (inferior) a tal calibre.

Quanto à forma das partículas sólidas, em geral, adopta-se critérios simplistas - considerar todas as partículas esféricas é o mais comum. O que não tendo sensível inconveniente nas suspensões diluídas no caso do SP habituais, pode ser aproximação inconveniente, uma vez que a interacção sólido/sólido ou sólido/fluído é sensívelmente influenciada pela forma.Assim, quando há que abandonar a hipótese da esfericidade introduzem-se, por exemplo, coeficientes fenomenológicos que reflectem a relação entre "as dimensões" das partículas. Estas e outras práticas mais ou menos elaboradas permitem, com frequência, simplificar a metodologia necessária para tomar em linha de conta o "efeito de forma", uma vez que tais coeficientes são quase estacionários com o calibre da fase mineralógica dominante. Trata-se, na verdade, de matéria muito trabalhada do ponto de vista fenomenológico, sobre a qual não é possível maior desenvolvimento nesta oportunidade.

Em consequência do progresso na utilização dos analisadores de imagem, pode muito bem acontecer que toda essa volumosa e pioneira análise da forma venha a ser abandonada e até esquecida, uma vez que os primeiros e promissores passos para a sua utilização em tempo real começam a ser dados em sistemas particulados de partículas graúdas.

Quanto à composição química em volume ou peso das partículas, dispõe-se já de instrumentação que a pode determinar em tempo real com satisfatório rigor, facto que representa enorme avanço nas tecnologias de controle dos SP em Mineralurgia e não só.

Também não se dispõe de instrumentação para medir, directamente, em tempo real, a densidade particular e, consequentemente, permitir a construção da respectiva função de distribuição marginal.

2.2 Dos Modelos

Nesta área, e referindo-nos aos processos mineralúrgicos, nas últimas décadas múltiplos modelos foram propostos. Terá sido mesmo a grande preocupação da investigação (mais aplicada do que teórica) dos últimos trinta anos em Mineralurgia. Apenas a investigação no domínio da química de superfície aplicada ao já citado processo de flutuação mereceu semelhante interesse.

No âmbito da modelagem dos processos, encontram-se construções teóricas (por vezes chamados modelos de conhecimento ou modelos fenomenológicos) a par de modelos mais ou menos empíricos que conduzem a *caixas pretas* ou *cinzentas*, como é bem conhecido.

Como seria de esperar, se atentarmos na evolução da Física desde os fins do Século passado (Teorias Cinéticas, Física Estatística Clássica, Termodinâmica Estatísitica, Física Quântica, etc, etc), os modelos de conhecimento utilizam abundantemente o conceito de probabilidade. Na verdade, quase todos eles admitem que "as acções" elementares são realizações de processos estocásticos e/ou de funções aleatórias. É certo que também apareçam modelos determinísticos onde figuram parâmetros derivados da própria configuração da aparelhagem e instrumentação e contendo certas grandezas macroscópicas do SP, mas são em menor número.

Qualquer que seja o tipo de modelos, a sua aplicação a específicos casos concretos é sempre apresentada, pelos autores, como sendo bem sucedida - é o obrigatório "case study" que a política redatorial das revistas da especialidade ou a organização dos congressos, etc, exigem.

Porém, quando se pretende generalizar a aplicação de modelos de conhecimento, a tarefa da sua colagem aos processos concretos a modelar obriga, pela própria estrutura daqueles, a parametrização adequada, seguida de *validação* e ajustamento. Meios informáticos eficientes e poderosos existem disponíveis para levar a bom termo tal tarefa[2]. Pode até dizer-se, exagerando um pouco, perante tais meios, que qualquer modelo de

2 Como se sabe o progresso da modelagem acompanhou o desenvolvimento dos algoritmos de colagem optimal.

conhecimento arquitectado coerentemente sobre algumas bases fenomenológicas qualitativamente correctas é sempre ajustável. Daí o poder chamar-se a essa classe de modelos "modelos de pseudo-conhecimento", visto não serem falsificáveis. Por exemplo, no que respeita às chamadas equações de difusão muito tem sido oferecido, inspirado principalmente na 1a. lei de Fick. Mas só em um caso, que o autor conheça, a equação geral de difusão de Chapman Enskog [1] foi utilizada como sugestão explicativa da complexa difusão dos SP em Mineralurgia[2].

Outra situação curiosa que ocorre em todos os modelos mineralúrgicos conhecidos da dinâmica dos SP é ignorar-se a temperatura local de Maxwell ou seja a temperatura termodinâmica quando esta tem significado.

Consequentemente, procura-se definir o estado desses sistemas fora do quadro da Termodinâmica (como é habitual na Mecânica Clássica dos Fluídos), talvez porque a inspiração de base da modelagem aí desenvolvida também resultou do que era habitual nos sistemas dinâmicos hamiltoneanos clássicos, apesar de se dispôr já de importante investigação no âmbito da Mecânica Estatística de Fluídos que assenta em sistemas particulados, como se sabe.

Para rodear esta imperfeição recorre-se por vezes a artifícios que implicam conceitos termodinâmicos mas que não são apresentados explicitamente.

Percebe-se, portanto, que ao tratar, em Mineralurgia, dos SP nada haja sido publicado[3], nem consta que haja naquela área qualquer investigação laboratorial sobre difusão térmica.

Além disso, quer os modelos de pseudoconhecimento, quer os modelos empíricos que se conhecem são, com raras excepções, modelos estacionários. Os modelos dinâmicos são difíceis de construir em consequência da ausência, em Mineralurgia, de investigação explícita sobre equações de estado dos SP. Daí que poucos tenham tentado abordar a respectiva dinâmica.

2.3 Do Controlo

Do que se escreveu certamente se conclui não existir teoria geral de controlo dos processos mineralúrgicos que ocorrem nos SP.

Conforme os casos, os hábitos e a experiência dos operadores, são adoptadas várias estratégias, de controlo. Trata-se de formas pioneiras mais ou menos evoluídas de sistemas periciais com forte interacção humana. Neste contexto é, por vezes, usada a metodologia EVOP ou outras dela derivadas.

Óbviamente, são frequentemente usados controlos antecipado ("feed forward") e retroactivo ("feed back"), mas muito raramente as variáveis assim controladas estão desacopladas.

As respectivas regulações ("set points") são fixadas por tentativa e tomando em consideração a experiência individual dos operadores que se traduz em matrizes de correlação qualitativa, muitas vezes construídas em ensaios piloto, e que, com o passar do tempo, se vão aperfeiçoando.

Também a escolha adequada das variáveis de estado, das variáveis controladas e das variáveis manipuladas, que têm merecido noutras áreas bom trabalho de análise, não tem preocupado muito a conceptualização dos sistemas de condução e controlo dos processos mineralúrgicos nos SP, nomeadamente quando se trata de processos de configuração complexa que se identificam como verdadeiros macro-sistemas de SP.

Existem simuladores mais ou menos elaborados (nomeadamente o que motivou tese de doutoramento na Secção de Mineralurgia e Planeamento Mineiro do I.S.T.[4]) apropriados para lidar com macro-sistemas de SP. Sempre ou quase sempre em regime estacionário.

De notar, porém, que, se os modelos estacionários das operações unitárias de SP constitutivos do simulador estacionário do macro-sistema, estiverem bem ajustados à fenomenologia dos processos mineralúrgicos e se tal simulador for algoritmicamente solúvel em tempo relativamente breve e, se se instalar o simulador em tempo real entre as variáveis medidas e as variáveis manipuladas, cria-se um sistema pericial onde a base de conhecimento e o motor de inferência são o próprio simulador.

Será, sem dúvida, sistema pericial fortemente determinístico, onde qualquer "aperfeiçoamento" só será possível alterando a parametrização. Porém se se colocar, por exemplo, um operador humano experiente como "observador" introduzir-se-á componente vaga (fuzzy) que eventualmente melhorará, sobre vários aspectos, tal sistema pericial.

De notar, antes de mais, que raramente a sensibilidade do sistema real é do mesmo

3 Com excepção de Nota Interna da Secção de Mineralurgia e Planeamento Mineiro [2].

grau da do macro-simulador em todos os blocos funcionais, circunstância que pode tornar os modelos sistémicos determinísticos inadequados ao controlo em tempo real, se se não tomarem precauções do género da citada.

3 Das Perspectivas

3.1 Introdução

Desta necessariamente rápida panorâmica do estado do conhecimento em Mineralurgia dos PSP, poderá ressaltar:

- Os instáveis sistemas particulados grosseiros e densos com que lida a Mineralurgia e no seio dos quais se processam evoluções irreversíveis carecem de investigação básica aprofundada. A necessária interdisciplinaridade dessa investigação aconselha que os problemas que suscitam sejam postos a equipas multímodas.
- A aceleração do modus operandi da indústria implica que o complexo mundial de processamento de minerais desenvolva continuado esforço para incentivar essa investigação. Nomeadamente na Europa, é urgente que programas, como MATÉRIAS PRIMAS E RECICLAGEM - BRITE/EURAM e ESPRIT do âmbito da CEE, realcem esta componente no binómio ID.

Interessa pouco que se processem inovações que, no fundo, sejam quase só substituição de inovação que se importaria. Mas é imperativo que a taxa de inovação gerada seja pelo menos igual à dos EUA. Para tanto, as indústrias em geral e a Mineralurgia em particular têm que reflectir sobre a abordagem das realizações a que se propõem, procurando novas saídas que só serão possíveis de conceptualizar dispondo de investigação de base avançada.

3.2 Tópicos para um Programa Desejável para a Década de 90

A dinâmica dos SP deverá ser sistematicamente revista.Acções no sentido de actualizarem o seu estado de conhecimento devem ser incrementadas, dando ênfase à rica fenomenologia acumulada e que se encontra dispersa. Será indispensável que se criem centros de rigorosa investigação que façam escola nesta primordial área do conhecimento.

No que concerne à modelagem e controlo haverá que acentuar a reflexão no que há de aleatório nos próprios modelos ditos determinísticos, depois das etapas da aquisição dos dados experimentais e seu ajustamento e até à colagem dos modelos aos dados experimentais ajustados (estimação dos parâmetros).

- Construir modelos dinâmicos estocásticos, no espaço dos estados, dos processos mais significativos em mineralurgia e desenvolver longa experimentação numérica, em laboratório e em piloto para os tornar generalizáveis, tanto quanto possível.
- Incrementar rapidamente as metodologias de controlos optimais estocásticos, "fuzzy" e recorrendo a sistemas periciais, uma vez que não é de crer que em tempo útil, se possam enquadrar aqueles processos, em modelos dinâmicos acabados.

Nesta área, além da interdisciplinaridade evidente, avulta a extensão da própria investigação, o que aconselha à criação de aglomerados Universidade-Indústria capazes de lançar Fundaçõesde que irradiem centros de excelência de indubitável valor.

No que respeita aos processos unitários, haverá que incentivar a investigação de base do processo de flutuação, da separação magnética e electroestática, do processo MHS, etc. E também procurar complementar operações mineralúrgicas com operações metalúrgicas, nomeadamente hidrometalúrgicas.

Em consequência do mais rigoroso conhecimento dos SP deverá procurar novos ou mais aperfeiçoados processos de separação e/ou de concentração.

4 Conclusão

A década de 90 será em Mineralurgia dominada por emergente inovação que promova novas saídas, quer quanto aos processos unitários, como no controlo sistémico das unidades de produção.

A realidade com a qual a Mineralurgia está e continuará a lidar é a escassez das matérias primas necessárias ao progresso, simultâneamente com a complexidade das suas ocorrências na Natureza.

Referências

[1] Chapman, S. e Cowling, T.G. (1964). *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*, University Press, Cambridge.

[2] Rogado, J.Q. (1980). *La variation du coefficiente de jigage avec la fréquence e l'amplitude*, Congresso da Société de l'Industrie Minérale, Vichy.

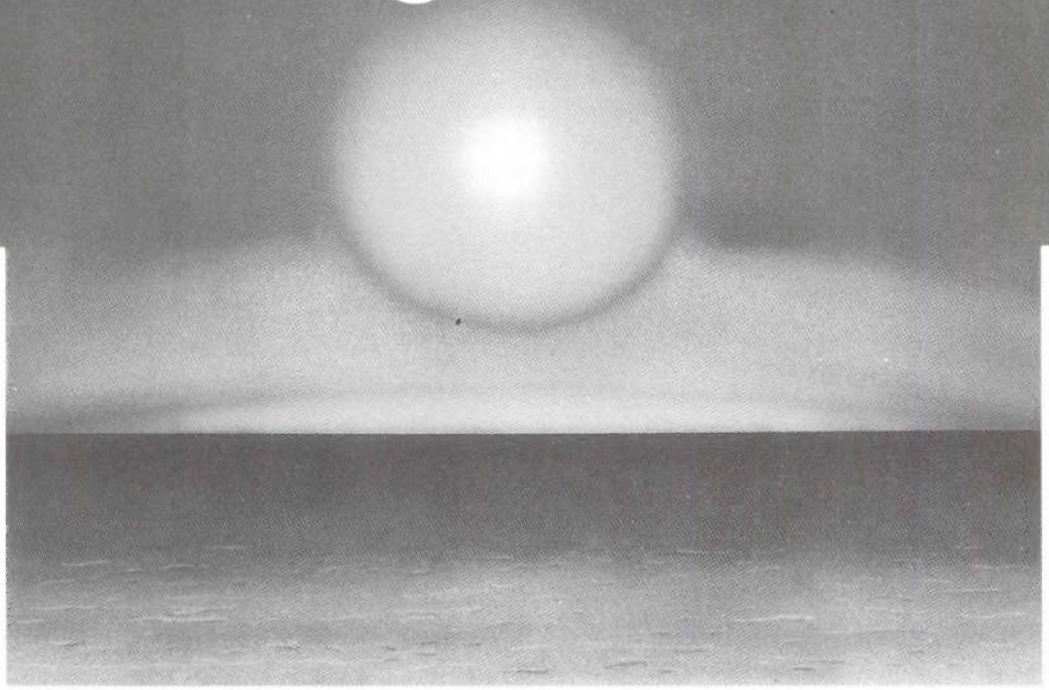
[3] Rogado, J.Q. (1989). *Sobre a difusão térmica*, Nota Interna JRLB.03/89 do Laboratório de Mineralurgia e Planeamento Mineiro, Lisboa.

[4] Durão, F.O. (1988). *Modelagem e Simulação de Sistemas Minerlúrgicos*. Tese de Doutoramento. Lisboa.

Sobre o Autor

José Quintino Rogado é Professor Catedrático do Departamento de Minas do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Temos Soluções Inovadoras Utilizamos Tecnologias de Ponta



Damos Luz às suas Ambições Profissionais

Cobrimos todas as áreas da Engenharia.
Utilizamos tecnologia de ponta em todas as especialidades.
Desenvolvemos projectos de investigação.
Integramos o progresso.
Distinguimos a competência.

EDP - Electricidade de Portugal, S.A.

Engenharia de Telecomunicações

Carlos Salema

RESUMO

Pretende-se, neste pequeno texto, dar uma ideia sumária da evolução da engenharia de telecomunicações, desde os seus primórdios em meados do século XIX até ao presente, procurando identificar as principais tendências de evolução futura. Com o objectivo de facilitar a leitura a não especialistas evitou-se recorrer a uma linguagem demasiado técnica.

ABSTRACT

This short text presents a brief account of the history of Telecommunications Engineering since its inception, in the middle of the 19th century, with the aim to identify the main tendencies of its future evolution. For easy reading by the non specialist technicalities are deliberately kept out as much as possible.

Telecomunicações são, por definição, as transmissões de informação à distância por meios electromagnéticos. Para conseguir este objectivo é necessário, na origem, transformar a informação em sinais eléctricos, em seguida transmitir estes sinais entre a origem e o destino e, finalmente, recuperar a informação original a partir dos sinais recebidos. O conjunto de meios e dispositivos utilizados para realizar esta função é habitualmente designado por sistema de telecomunicações.

Se existirem mais do que uma origem e um destino da informação que se pretende associar (um a um) de modo não previsível e por curtos períodos, é indispensável adicionar ao sistema descrito uma nova função - a comutação - definida como a identificação dos utilizadores origem e destino de cada transmissão e sua interligação.

Assim, é habitual identificar nos sistemas de telecomunicações os seguintes tipos de equipamento: terminal, transmissão e comutação.

As telecomunicações têm vindo progressivamente a afirmar-se, neste final de século XX, não só como uma tecnologia indispensável à vida quotidiana mas também como um instrumento, cuja importância é cada vez maior, do desenvolvimento económico.

Satisfazendo um desejo inato do homem - poder comunicar com os outros homens independentemente do local onde estes se encontrem - as telecomunicações afiguram-se hoje como protagonistas de mudanças importantes na organização social do trabalho e do lazer.

Em meados do século XIX, quando os dispositivos electrónicos ainda não existiam, foi possível criar os primeiros sistemas de telecomunicações e inaugurar os primeiros serviços telegráfico e telefónico. Recorria-se, então, a transdutores electromecânicos para transformar a informação, sob forma de voz ou de caracteres, em sinais eléctricos. Estes eram transmitidos por uma linha física, entre a origem e o destino onde, graças ao novo transdutor electromecânico, eram transformados numa réplica da informação original.

Para garantir um serviço de qualidade mínima era necessário não só dispor de transdutores fiéis, isto é capazes de, em conjunto, produzir uma réplica suficientemente próxima da informação original, mas ainda controlar a atenuação e a distorção dos sinais transmitidos.

As ondas electromagnéticas, previstas teoricamente por Maxwell, e cuja existência foi verificada experimentalmente por Hertz, permitiram conceber serviços de telecomunicações sem suporte físico entre o emissor e o receptor.

Apesar de algumas tentativas iniciais, que visavam estabelecer comunicações entre navios e estações em terra, os novos serviços só se começaram a desenvolver com o advento da electrónica. Esta permitiu não só a amplificação de sinais correspondentes à informação mas ainda a geração de sinais sinusoidais de frequência suficientemente elevada para serem radiados, eficazmente, com antenas de dimensão razoável. Modulando estes sinais sinusoidais com os de informação, tornou-se possível utilizar as ondas electromagnéticas como portadoras da informação que podia ser recuperada no receptor por desmodulação da portadora.

Começou então uma associação muito estreita e duradoura entre as telecomunicações e a electrónica em que os avanços da-

Original recebido para publicação em 19 de Setembro de 1991

quela estão, muitas vezes, dependentes das concretizações que esta permite.

O telégrafo, primeiro sistema de telecomunicações, era digital, isto é, utilizava sinais eléctricos que podiam tomar apenas um número limitado de valores. No entanto, os sistemas que se lhe seguiram, durante muitos anos, foram quase sempre analógicos, ou seja, recorreram a sinais capazes de tomar valores entre um máximo e um mínimo.

O transistor e, em especial, o circuito integrado vieram modificar a situação. A evolução acelerou-se nos últimos anos com os progressos da micro-electrónica e dos sistemas digitais, em particular dos microprocessadores.

A digitalização progressiva dos sistemas de telecomunicações tem vantagens técnicas e também económicas. Além disso permite progredir no sentido da integração, numa rede única, dos vários serviços hoje dispersos por redes distintas o que, para além de melhores serviços, prespectiva novas economias de escala.

Embora os sistemas de telecomunicações analógicos e digitais começassem por ser caracterizados de forma distinta, utilizando a largura de banda e a relação sinal-ruído para os primeiros e a velocidade (ou ritmo) de transmissão e a taxa de erros para os segundos, é hoje corrente utilizar de forma quase indiferente estes conceitos relacionados entre si pelo teorema da amostragem de Hartley e Nyquist e pela teoria de informação de Shannon.

Os ritmos de transmissão da informação têm crescido desde algumas dezenas de bit/s para o telégrafo, passando por algumas dezenas de kbit/s na telefonia até várias dezenas ou mesmo centenas de Mbit/s nas ligações entre computadores e na televisão. Embora os serviços interpessoais se tenham limitado a ritmos de transmissão moderados (sobretudo fonia), deixando para os serviços de rádio-difusão os serviços mais exigentes (televisão) há um interesse crescente em proporcionar nos serviços interpessoais ritmos de transmissão cada vez mais elevados (video-telefonia e televisão).

A procura crescente de serviços de telecomunicações, de ritmos de transmissão mais elevadas e de taxas de erro menores conduz à utilização de portadoras de frequência cada vez mais elevada.

No campo das transmissões guiadas, isto é, com suporte físico, esta tendência traduziu-se na alteração da configuração das linhas (metálicas), primeiro monofilares (com retorno pela terra), depois bifilares, mais tarde coaxiais e finalmente guias de onda.

Quando a frequência da portadora excede cerca de uma dezena de GHz a atenuação dos guias de onda metálicos torna-se proibitiva e começa a ter interesse o uso dos guias dieléctricos. Destes os mais utilizados são as fibras ópticas não só pela atenuação extremamente baixa, como pela elevada largura de banda e baixa dispersão.

A possibilidade de utilização de fibras ópticas deve-se, à existência de dispositivos opto-electrónicos capazes de converter os sinais eléctricos em ópticos. A integração de dispositivos ópticos, opto-electrónicos e electrónicos e a sua produção em massa, com custos baixos, prometem, em breve, iniciar uma nova revolução nos sistemas de telecomunicações.

As transmissões não guiadas sofreram uma evolução semelhante à das transmissões guiadas com uma diferença importante, devida à presença da atmosfera. Esta, desde que se pretendam distâncias superiores a cerca de 10 km entre emissor e receptor, limita a frequência máxima a cerca de 15–20 GHz.

A procura crescente de serviços de telecomunicações móveis (via rádio) e a reduzida largura de banda disponível levou à procura de sistemas cada vez mais eficientes na utilização do espectro. São exemplos típicos:

- os sistemas rádio celulares, em que os mesmos canais rádio-eléctricos são re-utilizados em células geograficamente distintas;
- a utilização simultânea da mesma frequência em várias ligações (multiplexagem por divisão no código);
- o recurso a frequências cada vez mais elevadas, até aos infra-vermelhos, para ligações a curta distância.

A adaptação do sinal a transmitir ao canal de transmissão evoluiu muito desde os primeiros sistemas de telecomunicações. Ao princípio era sobretudo uma questão de adaptação das impedâncias dos transdutores às linhas. Com a introdução da modulação passou a ter de considerar-se a frequência da portadora e do método de modulação mais eficaz face às características do canal, à qualidade pretendida e aos condiciona-

lismos tais como a largura de banda, as interferências ou a potência de emissão. Nos sistemas analógicos foi ainda necessário adaptar, por meio de filtros e igualadores, as características de transmissão dos componentes do sistema por forma a obter a característica global desejada. Finalmente nos sistemas digitais, codifica-se o sinal, tanto para reduzir eventuais redutâncias no seu conteúdo como para obter a qualidade desejada no canal disponível.

Embora a limitação da quantidade de informação no sinal emitido tenha sido praticada mesmo em sistemas analógicos, por meio de filtros passa-banda, foi nos sistemas digitais que se conseguiram os resultados mais espectaculares.

Um pequeno exemplo ilustra a situação. Tome-se a voz humana que ocupa uma banda da ordem de 8 kHz, entre cerca de 80 e 8000 Hz. Esta banda é reduzida a cerca de metade, mais rigorosamente a 3.1 kHz, entre 300 e 3400 Hz, nos sistemas telefónicos analógicos; trata-se aqui de uma redução de cerca de 2:1. Digitalizando o sinal telefónico analógico, com uma frequência de amostragem de 8 kHz e quantificando depois as amostras com 8 bits cada, resulta um ritmo binário global de 64 kb/s[1]. Existem hoje no mercado sistemas que reduzem o ritmo binário da voz de 64 kb/s para 9.6 kb/s (uma redução adicional de mais de 6:1), sem diminuição apreciável da qualidade, podendo mesmo atingir-se 2.4 kb/s (redução de 27:1) perdendo qualidade mas mantendo uma elevada intelegibilidade. Em televisão é possível reduzir os ritmos binários correspondentes a aplicação do teorema da amostragem 20 ou mais vezes mantendo a mesma qualidade subjectiva. É concebível que os novos sistemas de redução de redundância para imagens de televisão permitam reduzir muito mais os ritmos binários resultantes.

No campo da comutação, a evolução foi do manual para o automático, do electromecânico para o electrónico e do espacial para o temporal. No início a comutação era espacial e manual. No campo dos sistemas telefónicos constatou-se, rapidamente, que a comutação manual era incapaz de dar resposta ao tráfego existente. Assim, no princípio da século XX foram instalados os primeiros sistemas "Strowger" de comutação espacial automática. Estes sistemas, sucessivamente aperfeiçoados, dominaram a comutação telefónica até ao princípio dos anos sessenta, data a partir da qual foram progressivamente sendo substituídos por novos sistemas electromecânicos de comutação espacial, baseados primeiro em selectores de coordenadas e depois em matrizes de relés "reed". É importante recordar que o sistema telefónico automático mundial, por muitos considerado como o mais complexo sistema concebido e construído pelo Homem, foi de início totalmente, e ainda hoje é principalmente, constituído por comutadores electromecânicos.

A partir da década de setenta verifica-se a introdução de processadores electrónicos como orgãos de comando e controlo nas centrais telefónicas o que não só simplificou os circuitos mas sobretudo veio a permitir a oferta de novas facilidades aos utilizadores.

Na década de oitenta a tecnologia tornou económicamente viável as centrais telefónicas de comutação temporal o que veio a transformar os comutadores telefónicos em computadores especializados. A partir de então a evolução dos comutadores telefónicos segue de muito perto a evolução dos computadores, marcada pela crescente miniaturização e decréscimo do consumo de energia, pelo aumento crescente da importância do suporte lógico e, mais modernamente, pela tendência para a descentralização. Levada ao extremo, esta descentralização permite conceber uma rede telefónica em que a capacidade de processamento, comutação e mesmo gestão está distribuída ao longo da rede e não concentrada num pequeno número de pontos.

Ao finalizar e depois de ter sido referida a importância da electromecânica, da electrónica, do electromagnetismo aplicado, com destaque para a propagação e da radiação das ondas electromagnéticas e para a óptica, e dos sistemas digitais importa não esquecer o papel que a matemática e a estatística tiveram no progresso das telecomunicações. Cita-se a título de exemplo as equações diferenciais na propagação e radiação das ondas electromagnéticas, a análise de Fourrier e a teoria das transformadas na modulação e os processos estocásticos no ruído. A história revela até que certas técnicas matemáticas, como o cálculo operacional de Heaviside, foram introduzidas por engenheiros de telecomunicações.

Qualquer engenheiro de telecomunicações necessita pois, na sua preparação de adquirir uma sólida formação com base em matemática, física e sistemas digitais.

1 A maioria dos utilizadores não consegue distinguir o sinal analógico obtido a partir do sinal digital de 64 kb/s do sinal original.

Sobre este suporte deverá assentar um curriculum em que as disciplinas atrás referidas e naturalmente as relativas às tecnologias da telecomunicações encontram a sua cabal justificação.

Sobre o Autor

Carlos Salema é Professor Catedrático da Secção de Telecomunicações, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

A Investigação Matemática no IST: Situação actual e perspectivas futuras

A. Ferreira dos Santos

RESUMO

No presente artigo passa-se em revista a actividade de investigação no Departamento de Matemática do IST realizada no âmbito dos grupos de maior dimensão e analisam-se as perpectivas do seu desenvolvimento para os próximos dez anos.

ABSTRACT

In this paper the activity of the most significant research groups in the Department of Mathematics of IST is examined with the aim of evaluating its possible developments in the present decade.

O Departamento de Matemática que, na sua forma actual, engloba quatro grandes áreas científicas - Análise Matemática, Estatística e Aplicações, Análise Numérica e Matemática Aplicada e Ciência da Computação - foi criado em 1980, tendo-se desde o início dado prioridade à formação de grupos de investigação que podessem vir a ter algum peso no I.S.T. e no País. Assistiu-se na década de 80 a um crescimento considerável do número de doutorados que passou de 5 em 1980 para cerca de 30 em 1990. Procurou-se que este esforço de formação inicial se situasse num pequeno número de áreas de modo a poder atingir-se rapidamente uma dimensão com significado tanto a nível nacional como internacional o que, efectivamente, veio a conseguir-se, estando agora criadas as condições para o alargamento do Departamento a áreas que inicialmente não era realista considerar.

No que respeita à formação de investigadores é de realçar a criação em 1983 do Mestrado em Matemática Aplicada, que teve um papel determinante na formação de Assistentes que, na quase totalidade, não tinham preparação adequada ao início de uma investigação em Matemática. O Mestrado que hoje tem um carácter diferente do inicial para poder admitir os licenciados em Matemática Aplicada é, no contexto do País e na área da Matemática, o curso que mais Mestres tem produzido, o que é notável para uma Escola que só tardiamente incluiu a Matemática entre as suas áreas a de formação em pé de igualdade com as Engenharias e a Física.

Nos próximos dez anos esperamos assistir ao crescimento rápido dos actuais grupos de investigação e ao aparecimento de novas áreas como por exemplo a Geometria Diferencial, com um grupo em formação, ou a Matemática da Investigação Operacional, projectada para dentro de dois ou três anos. Espera-se igualmente assistir à consolidação da imagem internacional dos actuais grupos que já contam com diversos investigadores suficientemente conhecidos no estrangeiro.

Original recebido para publicação em 10 de Dezembro de 1991

Quanto aos temas que irão assumir maior importância na década de 90 não parece possível fazer qualquer previsão fundamentada mas o que pode afirmar-se é que se espera que os grupos existentes continuem a revelar suficiente capacidade para auscultar e acompanhar as grandes tendências da investigação matemática no Mundo.

Passa-se a seguir em revista a actividade dos grupos de maior dimensão existentes no Departamento de Matemática, dando conta do trabalho que se está a realizar e procurando na medida do possível dar alguma ideia do que poderá fazer-se no futuro.

Funções Generalizadas

No âmbito do grupo que se tem dedicado ao estudo das funções generalizadas, constituído actualmente por sete investigadores, foram realizadas, desde 1982, três teses de doutoramento e quatro teses de mestrado. A actividade do grupo insere-se fundamentalmente em linhas de investigação abertas pelo matemático português J. Sebastião e Silva, nas teorias das distribuições e das ultradistribuições e, em termos muito gerais, poderá dizer-se que os problemas que vêm sendo estudados constituem extensões naturais, às distribuições ou ultradistribuições, de resultados importantes da teoria clássica das funções.

No domínio da teoria das distribuições tem merecido especial atenção o estudo de propriedades algébricas e topológicas de determinadas noções de limite e valor de uma distribuição num ponto e de fixação de variáveis numa distribuição (noções essencialmente devidas ao matemático

polaco S. Lojasiewicz), bem como aplicações desse estudo:

a) à estruturação de uma teoria de integração de distribuições (complementar de resultados obtidos por Sebastião e Silva no mesmo domínio);
b) à generalização às distribuições sobre uma variedade diferenciável (sem ou com bordo) de alguns resultados importantes de Análise vectorial clássica, designadamente o teorema de Stokes, do qual foram obtidas algumas versões bastantes gerais;
c) à resolução de alguns problemas relativos a equações diferenciais (problema de Cauchy para certas equações diferenciais ordinárias e para algumas equações hiperbólicas, problemas com condições de fronteira para algumas equações elípticas);
d) ao esclarecimento das relações existentes entre os conceitos de limite de uma distribuição e o conceito de traço, usual na teoria dos espaços de Sobolev.

Ainda no quadro da teoria das distribuições foi possível obter uma generalização efectiva dos conceitos de valor e limite devidos a Lojasiewicz, para distribuições escalares ou vectoriais de uma variável real, o que abriu novas perspectivas de extensão para alguns dos resultados anteriores, dos quais já foi concretizada a aplicação ao problema de Cauchy. Pode destacar-se também, entre os temas de investigação em curso, a obtenção de resultados do mesmo tipo para distribuições de mais de uma variável.

Dos estudos directamente relacionados com o conceito de ultradistribuição - introduzido por Sebastião e Silva com o objectivo principal de ampliar os domínios das transformações de Fourier e Laplace - resultaram designadamente:

a) uma noção de produto multiplicativo de funções holomorfas por certos tipos de ultradistribuições, com reflexos em problemas de multiplicação de distribuições;
b) alguns resultados relativos a séries de multipolos e a propriedades da transformação de Fourier em certos espaços de ultradistribuições (em particular, teoremas do tipo Paley-Wiener);
c) noções de limite de uma ultradistribuição num ponto, com aplicações a problemas de prolongamento, à integração e à resolução de alguns tipos de equações diferenciais, no quadro das ultradistribuições.

Dos vários problemas em aberto neste domínio pode destacar-se a resolução de algumas questões de índole topológica, designadamente a introdução de topologias adequadas em alguns dos espaços de ultradistribuições considerados.

Equações Integrais e Teoria de Operadores

O grupo de Equações Integrais e Teoria de Operadores, actualmente com 8 investigadores, nasceu no início da década de 80 tendo vindo a crescer progressivamente à medida que diferentes elementos do grupo têm vindo a obter os seus doutoramentos.

No âmbito do grupo realizaram-se já 4 mestrados e dois doutoramentos devendo até ao final do ano lectivo ocorrer mais um doutoramento e um mestrado. No que respeita à produção de artigos científicos ela começa a atingir níveis comparáveis aos da produção em grupos congéneres nas boas universidades europeias.

O tema central da investigação na seio do grupo situa-se na área dos Operadores Integrais Singulares vindo a motivação para a definição dos problemas a abordar principalmente da área dos problemas de fronteira para equações elípticas especialmente os que surgem em Teoria da Difracção. O esforço principal tem sido posto nas condições de invertibilidade de operadores integrais singulares e na obtenção do seu inverso, quanto possível, questões que se consideram de grande interesse em aplicações à Engenharia e à Física e na abordagem numérica de equações envolvendo aqueles operadores. As contribuições científicas do grupo têm-se situado predominantemente no estudo de equações de convolução em intervalos e uniões de intervalos de $\mathbb{R}$, na formulação rigorosa de problemas em Espaços de Sobolev (incluindo o estudo de solubilidade desses problemas) e ainda na factorização de Wiener-Hopf de símbolos matriciais não racionais, questão que é fundamental para o estudo da invertibilidade do operador associado.

No seio do grupo iniciou-se há algum tempo uma discussão sobre a orientação futura da investigação, sobretudo no que respeita às áreas de aplicação que poderão servir de motivação para o trabalho futuro. Admite-se assim alargar o interesse do grupo aos chamados problemas inversos como é o caso do "inverse scattering" com inumeras aplicações em Engenharia e Física e ainda na solução explícita de certas equações diferenciais parciais não lineares, uma área que despertou grande interesse nas últimas duas ou três décadas e que continua a ser apontada como promisso-

ra. Uma outra possibilidade poderá ser a extensão de técnicas como a da factorização de Wiener-Hopf a equações operatoriais não lineares.

O grupo mantém contactos internacionais com grupos congéneres estrangeiros, especialmente europeus, e procura acompanhar as tendências da investigação na área em que trabalha.

Sistemas Dinâmicos e Equações Diferenciais

O grupo de investigação em Sistemas Dinâmicos e Equações Diferenciais, presentemente com sete investigadores doutorados mantem há cinco anos no IST um seminário sobre Sistemas Dinâmicos e Mecânica dos Meios Contínuos, frequentado por estudantes de mestrado e investigadores de Matemática, quer do IST quer de outras escolas. Este seminário tem trazido ao IST investigadores de renome internacional desta área de investigação, tendo nos últimos três anos cerca de metade destes seminários (três dezenas) sido apresentados por visitantes estrangeiros. Este grupo mantem relações estreitas com os grupos de investigação afins existentes na Europa, Estados Unidos, Japão e Brasil o que lhe permitiu ser o organizador de um NATO Advanced Research Workshop em 1986 em Lisboa subordinado ao título Dynamics of Infinite Dimensional Systems. No corrente ano realizou-se em Barcelona a conferência internacional de equações diferenciais EQUADIFF 91, na qual o grupo esteve representado através da apresentação de sete comunicações. A presente organização da conferência convidou o grupo a realizar em Lisboa dentro de quatro anos a conferência EQUADIFF 95.

Este grupo privilegia as relações com as Universidades e os grupos de investigação reconhecidos internacionalmente e, em particular, tem presentemente onze dos seus investigadores a preparar o doutoramento no estrangeiro.

Relativamente à produção científica, desde 1988 foram apresentadas duas teses de doutoramento, sete teses de mestrado e quatro trabalhos finais de curso, sendo o número de artigos publicados em revistas internacionais e proceedings comparável aos da produção dos grupos congéneres das Universidades americanas e europeias.

A área dominante de investigação é a Análise Matemática, privilegiando os aspectos de análise não-linear que têm grande importância para vários domínios da ciência, engenharia e aplicações tecnológicas. São as seguintes as áreas de intervenção: Sistemas Dinâmicos, Equações Diferenciais e Funcionais, Cálculo de Variações e Optimização, Métodos Geométricos em Análise Não-Linear, Teoria do Controlo e Mecânica dos Meios Contínuos.

Esta actividade de investigação encontra-se distribuida por três linhas de acção que se descrevem seguidamente.

Teoria Qualitativa de Sistemas Dinâmicos

Nesta linha considera-se o desenvolvimento e aplicação de técnicas da teoria qualitativa de sistemas dinâmicos para análise de sistemas não-lineares expressos em termos de equações diferenciais ou funcionais, com origem na Engenharia e outras áreas da Ciência ou Tecnologia.

Métodos de Análise Não-Linear em Mecânica dos Meios Contínuos

Considera-se nesta linha o desenvolvimento e aplicação de métodos variacionais e da teoria de equações diferenciais parciais a problemas não-lineares da mecânica dos meios contínuos.

Métodos de Análise de Sistemas Não-Linear e Teoria de Controlo

Nesta linha considera-se o desenvolvimento de métodos computacionais para a aplicação de técnicas da teoria dos sistemas dinâmicos à análise de sistemas não-lineares, considerando em particular aplicações em teoria de controlo.

Probabilidades, Estatística e Aplicações

A área de Probabilidades, Estatística e Aplicações abrange várias linhas de investigação designadamente Análise de Dados Categorizados e Teoria Estatística, Análise Multivariada, Processos Estocásticos Aplicados, Controlo de Qualidade e Optimização Estatística.

O esforço que tem sido posto na formação de novos investigadores tem paradoxalmente criado dificuldades ao desenvolvimento do trabalho de investigação devido ao pequeno número de doutorados com que a área se iniciou. Agora que esta fase parece estar em vias de ultrapassagem espera-se ver na década de 90 os frutos do investimento no domínio da formação.
Têm-se vindo a desenvolver relações de trabalho com grupos do IST que se dedicam a outras áreas científicas e também contactos com alguns sectores da indústria e de serviços, pensando-se na criação de um grupo de consultadoria que possa

dar a estes contactos uma forma mais institucional e permanente. Espera-se deles, por um lado, uma maior aproximação dos interesses do grupo às necessidades do País e, por outro, alguma motivação para a abordagem de temas de índole mais fundamental.

Na área de Probabilidades Aplicadas a investigação tem sucedido no estudo de sistemas de filas de espera, fiabilidade e controlo de qualidade, sob um ponto de vista interdisciplinar (onde a experimentação e os métodos numéricos desempenham um papel de algum relevo). Na área dos processos estocásticos os trabalhos em curso vêm sendo desenvolvidos em colaboração com grupos de investigação das Universidades de Cornell e Maryland; no domínio do Controlo de Qualidade, colabora-se com professores da Open University.

No que respeita à Análise Multivariada têm-se abordado entre outros temas Análise Factorial e modelos afins, em especial modelos de Classes Latentes e Multidimensional Scaling; Relações Funcionais e Estruturais; Análise Discriminante e modelos com Observações Repetidas. De entre os vários resultados com interesse já obtidos destaca-se um novo método para obtenção de Componentes Principais Robustas.

Em Optimização Estocástica o interesse tem-se centrado em problemas de fiabilidade e desenvolvimento de software para problemas concretos nesta área.

Na área de Análise de Dados Categorizados a investigação tem-se centrado no problema de dados incompletos, sendo de destacar a obtenção de soluções Bayesianas para mecanismos de censura informativa. Este trabalho já deu origem a vários artigos e comunicações, esperando-se ainda a conclusão de um mestrado.
Planeia-se orientar o trabalho futuro nesta área para a elaboração de métodos computacionais que permitam a implementação de vários tipos de metodologias de análise desse tipo de dados.
O trabalho em Teoria Estatística tem dado ênfase ao tratamento de tópicos avançados de Inferência Estatística (Clássica e Bayesiana) na linguagem rigorosa da Medida e Integração. Espera-se, em breve, a sua publicação visando preencher uma enorme lacuna no panorama editorial da área de Probabilidades e Estatística.

Muito do trabalho nestas duas frentes tem sido realizado em articulação com sectores congéneres de universidades brasileiras e norte-americanas.

Análise Numérica

A Análise Numérica é uma área ainda em fase de arranque embora conte já com quatro investigadores doutorados e três não doutorados. É uma área que se considera fundamental numa Escola com as características do IST e que só por dificuldades que não são específicas da Escola tem sido difícil de consolidar.

Os interesses dos elementos do grupo de Análise Numérica situam-se nos domínios de problemas de fronteira para equações com derivadas parciais em particular equações de Navier-Stokes (mecânica dos fluídos) e leis de comportamento parabólico-hiperbólico (mecânica dos meios contínuos) e ainda no domínio das equações integrais.

Pensa-se que durante a década de 90 será finalmente possível construir um grupo com dimensão suficiente para a produção científica do mesmo possa ter algum impacto no Departamento de Matemática e possa contribuir para que também nesta área a investigação no IST seja conhecida no estrangeiro.

Ciência da Computação

O grupo de Ciência da Computação tem orientado a sua investigação para a chamada Teoria da Computação, mais precisamente para o desenvolvimento dos instrumentos formais (lógicos, algébricos e categoriais) que são necessários para explorar (e propor) paradigmas computacionais, e para dominar as actividades a montante do processamento propriamente dito, desde a percepção à implementação de sistemas.

Nesta área, o Grupo tem vindo a propor uma formalização dos conceitos básicos da orientação por objectos enquanto paradigma de desenvolvimento de sistemas. Esta formalização tem conhecido duas frentes principais. Por um lado, a proposta de um modelo algebrico-categorial centrado na noção de processo enquanto formalização do comportamento de um objecto, incluindo concorrência e não-determinismo, e recorrendo a construções universais para a caracterização das operações de composição de objectos, incluindo reificação. Por outro lado, a formalização da orientação por objectos enquanto disciplina para a localização, decomposição e organização de especificações de comportamento. Esta abordagem recorre igualmente a técnicas de Teoria das Categorias para formalizar a criação de interfaces e o estabelecimento de interligações entre componentes dentro de sistemas, seguindo assim o paradigma proposto por J. Gorguen na sua teoria geral de sistemas mas explorando teorias em

vez de modelos matemáticos enquanto objectos estruturadores de especificações. Como formalismos base têm vindo a ser exploradas diversas lógicas modais, incluindo lógicas dinâmicas, temporais, e deônticas. Finalmente, desenvolvem-se métodos de prova dirigidos especificamente para algumas destas lógicas para dar apoio ao raciocínio sobre as especificações desenvolvidas.

É ainda importante salientar a investigação que tem vindo a ser conduzida no âmbito da representação de conhecimento jurídico, e na qual o Grupo tem colaborado com investigadores da área do Direito. Nesta área, o Grupo tem explorado lógicas deônticas onde se formaliza a noção de "dever" essencial em áreas específicas de aplicação como seja a elaboração de contratos, ou a formalização de políticas de comportamento de empresas ou indivíduos, que necessitam de formalismos que facilitem a tradução das relações normativas inerentes ao discurso, e o desenvolvimento das deduções relevantes.

As actividades de investigação acima mencionadas têm sido desenvolvidas em cooperação estreita com diversos grupos de investigação estrangeiros, nomeadamente com o Imperial College of Science, Technology and Medecine (Londres) e a Universidade Técnica de Braunschweig, no âmbito de projectos de investigação financiados pelo programa Esprit da Comissão das Comunidades Europeias. O seu impacte a nível internacional pode ainda ser medido pelo elevado número de publicações em revistas e livros da especialidade que o colocam ao nível dos seus congéneres europeus. O impacte do Grupo ao nível nacional pode medir-se não só em termos dos diversos projectos que têm obtido financiamento da JNICT, como na formação de investigadores na área da Computação, sendo de salientar que três teses de doutoramento e várias teses de mestrado foram produzidas no seu seio desde 1988.

Este crescimento do Grupo permite encarar um reforço nas áreas mencionadas, continuando a cultivar o perfil que tem vindo a desenvolver nas áreas da teoria da especificação, da representação de conhecimento e da teoria algébrica de processos, e de iniciar novas linhas de investigação que se têm vindo a revelar no seguimento da sua actividade, como sejam as da metodologia do desenvolvimento de sistemas e da engenharia de software.

Agradecimentos

O autor agradece a todos os colegas do Departamento de Matemática que contribuiram com textos sobre a investigação nos diversos grupos acima referenciados.

Sobre o Autor

A. Ferreira dos Santos é Professor Catedrático do Departamento de Matemática do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

SEMANA DA COOPERAÇÃO

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

19 A 25 DE ABRIL DE 1992

EXPOSIÇÃO - CIÊNCIA, INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

CONFERÊNCIA E PAINÉIS

21 DE ABRIL DE 1992

16.00h - PORTUGAL OS PALOP E O FUTURO

22 DE ABRIL DE 1992

10.00h - PROJECTO E PLANEAMENTO DA EDUCAÇÃO COMO FACTOR DE DESENVOLVIMENTO

11.00h - COOPERAÇÃO NO ENSINO, EDUCAÇÃO E FORMAÇÃO: O PAPEL DE PORTUGAL

15.00h - FINANCIAMENTO, PLANEAMENTO E GESTÃO NO ENSINO UNIVERSITÁRIO

23 DE ABRIL DE 1992

15.00h - COOPERAÇÃO, INVESTIGAÇÃO, INDÚSTRIA

16.00h - TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIAS, INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

24 DE ABRIL DE 1992

15.00h - COMUNIDADE ECONÓMICA EUROPEIA, CONVENÇÃO DE LOMÉ, PORTUGAL E OS PALOP

SECRETARIADO - I. S. T. - AV. ROVISCO PAIS . FAX - 899242
TEL. - 8470880/8481018

2ª semana da cooperação

Robótica e Sistemas Autónomos: Problemas e Tendências

João Sentieiro, Isabel Ribeiro e António Pascoal

RESUMO

Neste artigo pretende-se atingir três objectivos: i) descrever de maneira sucinta o que se entende por robótica e sistemas autónomos, ii) apresentar uma panorâmica dos métodos teórico-práticos correntemente utilizados na resolução de problemas nessas áreas, e iii) fornecer uma visão dos problemas em aberto para o futuro.

ABSTRACT

The objective of this paper is threefold: i) to give a brief survey of the areas of robotics and autonomous systems, ii) to summarize the methodologies that are currently being used to solve problems in these areas, and iii) to describe some challenging problems for future research.

1 Introdução

O termo robot deriva da palavra "robota", que em checo significa trabalhador (forçado). O termo tornou-se popular após a apresentação em Nova Yorque em 1922 de uma peça teatral do escritor checo Karel Capek, intitulada "Rossum's Universal Robots" [1], onde o autor descrevia a revolta de robots contra patrões humanos. O enredo da peça motivou o significado da palavra robot originalmente aceite na comunidade científica internacional: um sistema mecânico programável, destinado a executar trabalho coordenado (movimentação de ferramentas, encaixe de peças, polimento de superfícies, etc.). Para uma visão global e uma perspectiva histórica nesta área, remete-se o leitor para a vasta literatura publicada [2-5]. Os primeiros robots eram mecanismos simples actuados por motores eléctricos ou hidráulicos, e destinavam-se a repetir acções pré-determinadas por um operador. O programa de trabalho era gravado pelo operador, e o sistema de comando do robot limitava-se a ler o programa e a desencadear comandos (sempre os mesmos!) para actuação dos motores. Deste modo, o robot operava de maneira cega em relação ao ambiente. No caso de surgirem situações imprevistas, como por exemplo um obstáculo interposto entre o robot e a peça a movimentar, o robot não possuia capacidade sensorial que lhe permitisse reagir de modo a evitar colisões.

Com o avanço da tecnologia, os robots passam a ser equipados com processadores e sensores sofisticados (sensores para visão, tacto, força exercida sobre peças a manipular, etc.) que lhes permitem aperceberem-se do meio ambiente, e recalcular automaticamente os comandos a fornecer aos motores de acordo com a situação real encontrada. Em linguagem técnica, pode dizer-se que os robots passam a ser equipados com sistemas de controlo por retroacção de dados sensoriais.

Numa fase ainda mais avançada, os robots adquirem mobilidade e passam a deslocar-se no meio ambiente, isto é, adquirem autonomia [6]. É o caso de robots que se movem livremente em ambientes fabris (Veículos Guiados Automáticamente - AGV) [7], ou que executam tarefas de prospecção submarina sem ligação directa a um navio-mãe (Veículos Autónomos Submarinos - VAS) [8]. É razoável supor que no futuro os robots serão mecanismos complexos providos de grande autonomia, capazes de executar missões de longa duração sem supervisão humana.

As actividades de Investigação e Desenvolvimento em Robótica e Sistemas Autónomos que possibilitaram a evolução acima referida, e que potenciam as soluções e os sistemas robóticos do futuro, assentam num esforço *multidisciplinar que se apoia fundamentalmente na Engenharia de Sistemas e Controlo*. Têm como ponto de partida *descrições realistas dos sistemas considerados baseadas nas suas características tecnológicas e suporte físico (estrutura física do sistema a controlar, sensores e sinais, actuadores, electrónica de comando e processamento), e utilizam uma sólida base matemática e física na modelação, análise, projecto e simulação desses sistemas*. Por outro lado, contemplam os aspectos computacionais associados a estas áreas. O carácter multidisciplinar da investigação em Robótica e Sistemas Autónomos exige que o seu desenvolvimento se realize no âmbito de equipas que incluam investigadores de diversas áreas de engenharia de interesse e das ciências exactas que as suportam (matemática e física). Esta perspectiva motiva a estrutura deste artigo, no qual se identificam problemas e metodologias que têm vindo a interessar à equipa em que os autores se integram. A Secção 2 é dedicada a uma exposição sobre alguns dos problemas mais complexos que surgem no controlo de manipuladores robóti-

Original recebido para publicação em 1 de Julho de 1991

cos. Na Secção 3 a ênfase é posta em robots móveis, com realce para os robots autónomos terrestres e submarinos. Finalmente, na secção 4 introduz-se a visão por computador como suporte a sistemas sensoriais particularmente adequados às aplicações em robótica e sistemas autónomos.

2 Sistemas robóticos

Os sistemas actuais de supervisão de robots revelam-se eficientes em tarefas simples que envolvem o controlo preciso das articulações de robots com base fixa (manipuladores), mas exibem mau desempenho em acções que requerem coordenação com o meio ambiente em resposta a informação sensorial complexa (p.e. informação fornecida por sistemas de visão e sonar, e medidas de forças e binários exercidos sobre o meio ambiente). O desempenho de acções mais sofisticadas que envolvam cooperação entre manipuladores robóticos e façam apelo ao conceito de planeamento óptimo de tarefas e trajectórias, carece ainda de um esforço de investigação e desenvolvimento considerável. A sua concretização permitirá o desenvolvimento de sistemas robóticos que operem em modo autónomo nos ambientes mais diversos, tais como: manipuladores robóticos que operam em cooperação no transporte de grandes cargas, robots móveis que operam em instalações fabris, e manipuladores robóticos que efectuam tarefas de inspecção e recolha de amostras em ambientes hostis (p.e., fundos marinhos, centrais nucleares, minas).

2.1 Manipuladores

Dado o insucesso dos métodos tradicionais na resolução de problemas avançados de comando de manipuladores robóticos, assiste-se presentemente à tendência de encarar esses problemas à luz da prática moderna do controlo. De facto, o sucesso das estratégias modernas adoptadas para o projecto e implementação de controladores para sistemas de grande complexidade, como os que ocorrem nas áreas das ciências espaciais, aeronáutica, etc., fazem antever o seu impacte na área da robótica. Sob este novo ponto de vista, o controlo de sistemas robóticos de alto desempenho passa a ser encarado como uma tarefa multidisciplinar que envolve, entre outros, os seguintes tópicos especializados: modelação dos manipuladores robóticos e do ambiente circundante com base em princípios físicos, identificação e validação dos modelos, projecto e realização de sistemas de controlo para desempenho robusto, técnicas de percepção sensorial para controlo complacente, e interacção de sistemas de controlo locais com módulos de alto nível para planeamento de tarefas. No que se segue, citamos três exemplos de problemas (parcialmente resolvidos) com interesse nesta área.

2.1.1 Manipuladores robóticos cooperantes

Num número considerável de tarefas, é necessário coordenar dois ou mais manipuladores robóticos que transportam cargas elevadas, ou executam, em cooperação, tarefas de alta complexidade. As técnicas de controlo de manipuladores cooperantes estão ainda pouco desenvolvidas, e são praticamente inexistentes para o caso de manipuladores construídos com materiais flexíveis ou que se movam em ambientes não estruturados.

2.1.2 Controlo complacente de manipuladores

Num grande número de tarefas é necessário tornar os manipuladores robóticos "complacentes", de modo a adaptarem o seu modo de operação à estrutura desconhecida do meio ambiente com que interagem. Isto possibilita a execução de operações de encaixe de peças, polimento de superfícies, e rebarbagem de materiais.

2.1.3 Controlo de manipuladores flexíveis

Os manipuladores robóticos convencionais têm uma relação peso próprio/peso deslocado elevada, o que reduz a sua eficiência, transportabilidade e velocidade de operação, assim como as condições de segurança. Por outro lado, os motores de grande potência necessários para actuar os manipuladores robóticos exibem fenómenos complexos de não-linearidade, histerese, fricção, zonas mortas, etc., que dificultam o projecto de sistemas de controlo de alto desempenho. Para solucionar estes problemas, assiste-se presentemente à tendência para construir robots com materiais leves que exibem flexibilidade estrutural. As estratégias vulgarmente utilizadas no controlo de manipuladores robóticos industriais revelam-se inadequadas para o controlo de manipuladores deste tipo, uma vez que se baseiam em modelos dinâmicos de corpos rígidos que ignoram a flexibilidade distribuída ao longo dos troços dos manipuladores. Para um avanço rápido na área do controlo de manipuladores robóticos que exibem flexibilidade, é necessário desenvolver técnicas de modelação, análise e projecto, paralelamente segundo duas linhas gerais, considerando: i) modelos de parâmetros distribuídos obtidos a partir das equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento

dinâmico de estruturas mecânicas elásticas; ii) modelos de parâmetros concentrados que correspondem a considerar a dinâmica de um número finito, relativamente reduzido, de "modos flexíveis". Em ambos os casos, existem problemas interessantes a resolver quanto à localização de sensores e actuadores na estrutura, e quanto às leis de controlo a adoptar [10]. Revela-se também aliciante estudar o comportamento de "braços" com propriedades mecânicas diversas, em particular os fabricados a partir de materiais poliméricos ou materiais compostos (materiais reforçados com fibras, materiais granulosos, ligas metálicas, etc.), e estabelecer o seu impacte na construção dos manipuladores robóticos do futuro.

3 Robots móveis autónomos

3.1 Robots móveis terrestres

Nos últimos anos tem-se verificado um interesse crescente pelo desenvolvimento e aplicação de veículos autónomos, i.e., veículos com capacidade de movimentação e de actuação autónoma em ambientes estruturados ou não estruturados, [11]. Este tipo de robot aceita descrições de alto nível das tarefas a desenvolver e executa-as sem intervenção humana.

Como exemplos de aplicação citam-se o transporte automático de peças e materiais em ambientes industriais, o transporte de pequenas encomendas em edifícios (centrais de correios, hospitais), o combate a incêndios, a demolição de estruturas de construção, a limpeza de grandes zonas industriais, a vigilância em centrais nucleares, o apoio à prospecção de minas, etc.

Para a operação de robots móveis autónomos actuando isoladamente ou em cooperação com outros robots concorrem diversas componentes, nomeadamente o controlo de condução, a aquisição e interpretação de dados sensoriais, a navegação, o planeamento de trajectórias [12], [13] e o planeamento de tarefas. O processamento e interpretação/fusão de dados sensoriais, fazendo intervir técnicas do Processamento de Sinal, fornece o mapa do ambiente na vizinhança do robot.

A partir de descrições dos ambientes em que os robots operam, da sua localização e da definição do ponto de chegada para a realização de uma tarefa, pretende-se que o robot móvel se desloque ao longo de uma trajectória óptima, livre de colisões com obstáculos fixos ou móveis (por exemplo, outros veículos móveis): este é o problema do planeamento de trajectórias. Para a sua resolução concorrem, nomeadamente, técnicas oriundas do Controlo Óptimo e da Inteligência Artificial, capazes de lidar com conhecimento insuficiente do meio ambiente a priori, com incerteza resultante de erros de localização, e com restrições da cinemática dos veículos.

Numa rede de robots móveis autónomos actuando em cooperação coloca-se ainda o problema do planeamento de tarefas. A questão que se pretende resolver diz respeito à ordem pela qual as tarefas são atribuídas aos diversos veículos. Na sua solução, que não pode ser encontrada sem atender ao planeamento de trajectórias, são usuais metodologias oriundas da Teoria de Controlo Óptimo, da Teoria do Sequenciamento, e ainda abordagens baseadas em sistemas periciais. Estas últimas têm sido aplicadas com êxito na construção de robots móveis com capacidade de decisão.

3.2 Robots submarinos

O mundo submarino é um ambiente no qual a operação humana é ineficiente e acarreta riscos, e por isso representa um cenário ideal para a aplicação de robots. Como exemplos de funções que um veículo submarino de pequeno porte equipado de manipuladores pode cumprir eficientemente, citamos: i) construção, inspecção, e reparação de estruturas submersas, ii) recolha de amostras geológicas e de dados ambientais ecológicos, e iii) exploração mineira sub-aquática.

A exploração do mundo submarino é presentemente encarada com grande interesse pela comunidade internacional. A nível da Comunidade Europeia, o programa MAST (Marine Science and Technology) tem como objectivo parcial desenvolver métodos para o projecto e implementação de sistemas avançados de controlo para veículos submarinos de pequenas dimensões, equipados com manipuladores robóticos e câmaras de visão, que executem operações de inspecção e de manipulação de objectos submersos. Importa salientar que o estudo e implementação de dispositivos sensoriais em ambientes aquáticos [14] são componentes imprescindíveis para a operacionalidade do veículo equipado com manipuladores. Em última instância, um sistema de controlo de alto desempenho é fortemente dependente da qualidade dos sensores que o ligam ao mundo "real".

Representa tarefa aliciante construir e controlar um veículo autónomo submarino (VAS) accionado por hélices, sem "cordão umbilical" que o ligue a um navio base, e com um processador central e siste-

mas de posicionamento e comunicações que lhe permitam seguir uma trajectória desejada sem intervenção humana [15].

4 Visão artificial para sistemas robóticos

Para se moverem e realizarem tarefas complexas em ambientes não estruturados e variáveis no tempo, os robots necessitam de ter acesso a descrições rigorosas e actualizadas (modelos) desses ambientes, suportadas em conhecimento *a priori* e no processamento sofisticado de informação fornecida por sensores. Quanto mais complexos são os ambientes que se pretendem modelizar, mais rica em conteúdo deverá ser a informação adquirida pelos sensores. Este tipo de questões tem motivado, nos últimos anos, intensa actividade de investigação na área da Visão por Computador. De uma forma não rigorosa pode dizer-se que o objectivo central da Visão por Computador consiste em "a partir de uma sequência de imagens de um objecto ou de uma cena (móvel ou estacionária), adquiridas por um observador mono ou polinocular (em movimento ou estacionário), compreender o objecto ou cena envolvidos e as suas propriedades tridimensionais" [16].

O que se entende por compreender um objecto ou cena é uma questão que tem preocupado a comunidade da Visão Artificial. A sua discussão levou ao aparecimento de duas escolas: a Escola de Reconstrução e a do Reconhecimento. O pensamento da primeira foca-se na recuperação de um conjunto de parâmetros físicos da cena visual (por ex: profundidade e orientação de superfície, contorno de objectos, direcção de fontes de luz) e suporta-se essencialmente em técnicas de processamento de sinal. A Escola do Reconhecimento revela-se mais preocupada com a identificação e descrição dos objectos visíveis e usa ferramentas oriundas do Reconhecimento de Padrões e da Inteligência Artificial [17]. Qualquer delas propõe metodologias que privilegiam níveis de compreensão diferentes sobre o que é um sistema integrado de percepção visual.

Em última análise, a actividade de investigação desenvolvida no sentido da recuperação de características tridimensionais de uma cena a partir das propriedades bidimensionais das suas imagens, e os progressos feitos no domínio da identificação e classificação de classes de objectos visíveis, podem constituir contribuições importantes para a concretização de sistemas robóticos com reais capacidades visuais. Reflectindo a actividade que o grupo que os autores integram tem vindo a desenvolver, identificam-se, sem se pretender ser exaustivo, alguns problemas em aberto.

Os problemas em Visão por Computador são geralmente mal colocados ("ill-posed") no sentido em que, ou não possuem solução, ou não têm solução única, ou a solução não depende de forma contínua dos dados disponíveis. Para contornar esta dificuldade é necessário incorporar conhecimento prévio sobre o problema, sob a forma de restrições que relacionam o espaço 3D com a sua projecção bidimensional. A Teoria da Regularização, formulada por via determinística ou estocástica, tem sido utilizada com êxito nalguns problemas de Visão.

O facto da informação adquirida pelos sensores estar corrompida por ruído, tem levado recentemente a desenvolvimentos interessantes na área de algoritmos de processamento estáveis e robustos face a incertezas e ruído nos dados.

Embora a informação adquirida por sensores visuais possa conduzir a descrições rigorosas e detalhadas da cena, o pesado processamento envolvido pode justificar, em certos casos, outro tipo de abordagem de processamento mais leve com prejuízo da qualidade da descrição (p.e. usando imagem sonar) , ou ainda a opção por uma filosofia integrada (Fusão Sensorial) que explore as potencialidades associadas à imagem Vídeo e à imagem Sonar.

5 Conclusões

Os robots das primeiras gerações eram sistemas pouco sofisticados, destinados a substituir os operadores humanos na execução de tarefas repetitivas em ambientes estáticos e estruturados. Este tipo de restricções reduzia o seu campo de aplicação. De facto, a grande maioria dos ambientes onde se justifica a utilização de sistemas robóticos são não estruturados e variantes no tempo. Estas características impulsionaram o desenvolvimento de novos sensores e de algoritmos de controlo mais sofisticados que permitiram desenvolver robots com maior flexibilidade e capacidade de reacção a alterações nos ambientes, ou seja, maior autonomia. Prevê-se que no futuro os robots possam realizar missões complexas em ambientes hostis de difícil acesso, ou inacessíveis a seres humanos (ambientes submarinos, radioactivos, fortemente poluidos). Para actuar neste tipo de cenários, os sistemas robóticos têm de possuir uma autonomia acrescida. Contribuições das áreas do Controlo, Processamento de Sinal (Imagem e Visão), Inteligência Artificial e das Ciên-

cias da Computação, são essenciais para atingir esse objectivo.

6 Bibliografia

[1] Groover, M.P., Weiss, M., Nagel, R.N. and Odrey, N.G., (1987). *Industrial Robotics: Technology, Programming and Applications*, McGraw-Hill Ed., New York.

[2] Asada, H. and Slotine, J.J.E. (1986). *Robot Analysis and Control*, John Willey and Sons, New York.

[3] Fu, K.S., Gonzalez, R.C. and Lee, C.S.G. (1987). *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill Ed., New York.

[4] Wolovich, W.A. (1987). *Robotics: Basic Analysis and Design*, Holt, Rinehart and Winston, Inc. Ed. New York.

[5] Paul, R.P. (1981). *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press, Cambridge, Mass.

[6] Sequeira, J., Sentieiro, J. (Junho de 1991). An Architecture for Intelligent Mobile Robots, *The European Robotics and Intelligent Systems Conference - EURISCON 91*, Corfu, Grécia.

[7] Ribeiro, M.I. (Maio de 1991). Veículos Guiados Automaticamente: princípios de funcionamento e aplicações, *Seminário de Tracção Eléctrica*, FEUP, Porto.

[8] Silvestre,C., Pascoal, A. (Março de 1991). A Robust Position and Attitude Control System for an Autonomous Underwater Vehicle, *Proceedings of the Symposium on Robust Control System Design using H-Infinity and Related Methods*, University of Cambridge, U.K.

[9] Costeira, J.P., Fernandes, J.P., Victor, J.A., Sentieiro, J.J.S. (Julho de 1989). VER- A Stereo Vision System for Mobile Robots, *IMA-Conference on Robotics*, Loughborough, U.K.

[10] Pascoal, A., Kosut, R., Franklin, G., Workman, M. (Junho de 1989). Adaptive Time Optimal Control of Flexible Structures, *Proceedings of the American Control Conference*, Pittsburgh, EUA.

[11] Cox, J.J., Wilfong, G.T. (ed.) (1990). *Autonomous Robot Vehicles*, Springer-Verlag.

[12] Resendes, C., Cabral, R., Ribeiro, I. (Julho de 1990). Path Planning and Steering Control for Mobile Robots, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Robotics and Manufacturing*, Canada.

[13] Resendes, C., Cabral, R., Ribeiro, I. (Julho de 1990). An Algorithm for the Steering Control for of Mobile Robots, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Tsuchiura, Japão.

[14] Victor, J.A., Sentieiro, J.J. (Junho de 1991). *MOBIUS: Report on the Development of a Dynamic 3D Vision System for Underwater Vehicles*, (MAST Program), CAPS/LRPI, Relatório Interno.

[15] Pascoal, A., Silvestre, C. (Maio de 1991). *UBC-Underwater Bottom Crawler: Report on the Development of a Control System for a Free Swimming Vehicle*, (MAST Program), CAPS/LRPI, Relatório Interno.

[16] Horn, B.K.P. (1986). *Robot Vision*, MIT Press, Cambridge, MA.

[17] Victor, J.A.S., Costeira, J.P., Tomé, J.A., Sentieiro, J.J. (Junho de 1991). A Computer Vision System for Characterization and Classification of Flames in Glass Furnaces, *Proceedings of the 1991 IEEE IAS Annual Meeting*, Dearborn, Michigan, U. S. A..

Sobre os Autores

João Sentieiro, Isabel Ribeiro e António Pascoal são Professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa e Investigadores no Centro de Análise e Processamento de Sinais (CAPS) da UTL e no Laboratório de Robótica e Processamento de Informação (LRPI) do IST. Integram o Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) financiado pelo programa CIÊNCIA.

ADIST - Associação para o Desenvolvimento do Instituto Superior Técnico

- **Formação Especializada**
- **Apoio a projectos de Investigação e Desenvolvimento**

Uma Associação reconhecida como de Utilidade Pública

ao serviço do Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais , 1096 Lisboa Codex - Telef. 802045

Tendências da Engenharia Informática

Amílcar Sernadas

RESUMO
Após uma muito breve panorâmica dos sistemas computacionais, as tendências da Engenharia Informática são analisadas nas suas vertentes principais: materialização, programação, interacção, normalização e teorização.

ABSTRACT
After a very brief overview of computing systems, the trends of Computer Engineering are analysed in their main aspects: hardware, software, "wetware", "standardware" and "theoryware".

1 O que é a engenharia informática?

A engenharia informática é relativamente recente quando se compara aos ramos tradicionais da engenharia. Ainda há quem argumente não se tratar de um novo ramo da engenharia mas, quando muito, de um conjunto desorganizado de áreas de aplicação de domínios tradicionais de engenharia e ciência, nomeadamente da engenharia electrotécnica e da matemática. Mas esperamos, antes do início do séc. XXI, ver a engenharia informática transformada num ramo perfeitamente desenvolvido, embora ainda fortemente ligado a outras áreas.

Nesta fase não é ainda claro se engenharia informática vai preencher ou não o vasto espectro da engenharia de informação. Se assim for, algumas das áreas por enquanto tradicionais da engenharia electrotécnica podem transferir-se para este novo campo, nomeadamente as que se relacionam com as camadas mais abstractas dos sistemas de telecomunicações. Devemos também ter presente o exemplo da fronteira entre electrónica e os sistemas digitais: uma parte significativa da electrónica digital, incluindo por exemplo *VLSI design*, enquadra-se facilmente numa definição ampla de engenharia informática.

Idêntico problema se levanta se olharmos para a fronteira entre os fundamentos teóricos da engenharia informática e as áreas da matemática com ela relacionadas, nomeadamente a lógica e a teoria da computabilidade e da complexidade.

Assumindo uma posição geral em relação a estes problemas de caracterização, poderíamos talvez utilizar o termo *engenharia de informação* em vez do termo mais restrito utilizado no título deste artigo. Na verdade, este novo ramo da engenharia centra-se na produção de "máquinas de informação". Por máquina de informação entende-se uma máquina que manipula "objectos" que não têm interesse por si próprios, mas apenas quando encarados como "linguagem" utilizada para denotar os objectos que têm interesse por si mesmos – isto é, uma máquina que manipula símbolos. A título de exemplo, considere-se um sistema de reserva de passagens aéreas como uma máquina de informação capaz de receber, armazenar, manipular e emitir (por solicitação) informação acerca dos voos, lugares, etc. Tal máquina é capaz de manipular símbolos relativos a estes aspectos. Dependendo do nível de abstracção, estes símbolos são correntes eléctricas ou *bits* – que obviamente só têm interesse quando utilizados para denotar objectos no mundo real.

Concluindo: a engenharia de informação dedica-se à produção de "sistemas de informação" eficazes e economicamente viáveis suportando todas as operações relevantes, incluindo armazenamento e processamento. O objecto da engenharia de informação não é o mundo físico enquanto tal, mas qualquer parte dele quando utilizada como "linguagem" para representar o conhecimento acerca de algo mais. Os conceitos fulcrais da engenharia de informação relacionam-se com a noção de semântica de linguagens, uma vez que é bastante difícil estabelecer a correspondência entre um símbolo e a sua denotação.

Até agora, os sistemas computacionais apenas trabalham com linguagens "formais", isto é, com linguagens de sintaxe estrita e semântica bastante limitada no âmbito de outra linguagem formal. Neste sentido forte, podemos afirmar que, até agora, a engenharia de informação apenas foi capaz de produzir máquinas de informação formais. A única máquina de informação conhecida que trabalha num cenário mais geral, não formal, não é um artefacto – é o ser humano.

Finalmente, também importa assinalar que o instrumento mais comum da engenharia de informação é a máquina "universal", que é uma máquina que pode ser "programada " para imitar qualquer ou-

Original recebido para publicação em 30 de Maio de 1991

tra máquina desejada. Por programa entende-se uma frase numa linguagem (de novo formal!) que a máquina universal pode processar de modo a ser capaz de imitar o comportamento de uma máquina específica.

2 O papel crescente dos sistemas computacionais

Para complementar a caracterização atrás feita da engenharia de informação, importa recordar a evolução dos sistemas computacionais. Os primeiros computadores digitais foram concebidos como máquinas calculadoras, embora a sua utilidade para armazenamento de informação tivesse sido imediatamente apreendida. Mas os seus antecessores podem encontrar-se no domímnio das máquinas de controle, por exemplo na indústria têxtil. Foi neste contexto que nasceu a noção de programa.

Mais ainda, os computadores digitais, como os conhecemos, foram primeiramente introduzidos como máquinas universais. Os conceitos teóricos subjacentes eram simples e elegantes. A principal dificuldade residia, e reside ainda, no meio tecnológico. Mesmo hoje, países com uma indústria bastante avançada têm-se revelado incapazes de dominar algumas das tecnologias-chave.

Os sistemas computacionais cedo encontraram aplicações no controle e, posteriormente, nas comunicações. Depois, a ideia de máquinas universais foi adoptada nos processos industriais.

Ainda é muito mal compreendido que, na maioria das aplicações, os computadores sejam utilizados como armazenamento de informação e aparelhos de comunicação. As funções de calculador são secundárias. E, até mesmo nos sistemas cujo objectivo primordial é calcular, as outras funções têm-se vindo a tornar cada vez mais importantes.

A título de exemplo, considere-se uma aplicação da engenharia mecânica: há anos os utilizadores ficariam satisfeitos com um conjunto de bibliotecas para fazer cálculos de estruturas usando técnicas de elementos finitos. Hoje, um sistema satisfatório deverá também suportar uma interface sofisticada para os seus utilizadores bem como para comunicação entre estes. Poderá também comunicar com outros sistemas computacionais responsáveis pelo controle de instrumentos mecânicos utilizados na produção dos elementos pretendidos. E poderá ainda conservar uma base de dados de *designs* anteriores a serem reutilizados quando necessário.

A função de integração parece ser hoje uma tendência muito clara. Esperamos alcançar, no futuro, níveis de integração muito mais elevados.

3 Materialização

A evolução da tecnologia de *hardware* tem sido à volta de um aumento constante da razão *performance*/preço nos dispositivos de processamento e de armazenamento. As unidades de processamento têm evoluído mais depressa que as unidades de disco, graças aos processos em VLSI.

No futuro, o progresso do poder de processamento é esperado em várias frentes, uma vez que a tecnologia actual parece estar a atingir um ponto de saturação. O mesmo acontece com os diferentes materiais (em substituição do silício) ou com os diferentes (mais rápidos) efeitos (como circuitos quânticos). Alterações revolucionárias, como representar um *bit* ao nível molecular, estão ainda muito distantes.

Mas uma frente completamente diferente em que se esperam resultados, para breve, é a da arquitectura – por enquanto, quase todos os sistemas computacionais seguem de muito perto a arquitectura sequencial, originalmente proposta por von Neumann, segundo a qual a máquina opera sequencialmente, fazendo uma única operação de cada vez. Arquitecturas massivamente paralelas prometem um poder computacional de várias ordens de grandeza mais elevado sem alteração dos materiais.

Nesta fase colocam-se muitos problemas importantes teoricamente tratáveis, que desafiam os mais poderosos computadores actuais. A pressão económica (e militar) exige progressos constantes na capacidade dos computadores.

O progresso futuro no volume de armazenamento com capacidade de leitura-escrita directa aleatória parece residir na área dos discos ópticos. É necessário um salto significativo da razão *performance*/preço para o volume de armazenamento, antes da aceitação da próxima geração de sistemas computacionais (aqui *performance* = tamanho × velocidade de acesso). Os sistemas actuais pressupõem a disponibilidade de quantidades de espaço de armazenamento sempre crescentes, de preferência com tempos de acesso cada vez mais curtos. Os sistemas multimédia, por exemplo, impõem, neste campo, exigências muito maiores.

Outra área onde se espera em breve progresso notório é a base tecnológica para a comunicação entre compu-

tadores. Os computadores actuais comunicam via redes ultrapassadas, inspiradas nos sistemas telefónicos tradicionais. Espera-se que a tecnologia baseada na óptica, mais rápida, em breve ajude a ultrapassar as dificuldades actuais dos dois sistemas. A comutação óptica é uma das tecnologias-chave nesta área.

A cooperação de muitos computadores nessas redes muito rápidas, operando sobre o mesmo problema, também se tornará possível, mas só após ultrapassados alguns dos problemas de integração muito difíceis – muito progresso é necessário, por exemplo, em protocolos de comunicação de elevado nível para as comunidades heterogéneas de sistemas e ainda em sistemas operativos distribuídos.

4 Programação

O principal problema no âmbito do *software* (isto é, programação) é a actual inadequada capacidade de programação – a capacidade de programação mundial está bastante aquém das necessidades reais. De facto, este problema podia ter sido previsto logo à partida: a ideia da existência de máquinas universais programadas para imitar qualquer máquina pretendida pressupõe a viabilidade de máquinas universais de baixo preço (exigência que parece ter sido satisfeita) bem como programadores baratos.

Como programar é ainda essencialmente uma tarefa que requer a perícia de um ser humano muito bem treinado, a questão não surpreenderá ninguém.

Este problema é composto pelo factor de manutenção – esperamos um elevado grau de flexibilidade das máquinas obtidas através da programação de uma máquina universal! Se mais tarde sentirmos que a máquina deve fazer algo mais , pensamos que basta fazer uma pequena alteração no programa. Na verdade, é quanto basta, mas suficiente para ocupar muitos dos programadores do mundo. Grande parte da comunidade de programadores gasta o seu tempo na manutenção de velhas aplicações e não sobram programadores para satisfazer as necessidades de novas aplicações. Em grandes organizações, com elevado nível de automatização dos seus procedimentos via computador, é sabido que, ao cabo de alguns anos, mais de 80% da mão-de-obra da programação é absorvida pela manutenção. E note-se que parte dessa manutenção é necessária não devido a alterações da funcionalidade pretendida, mas simplesmente por ter havido alterações nos sistemas subjacentes (por exemplo um novo ficheiro de gestão de sistemas) o que exige algum esforço de adaptação.

Esta crise dos recursos de programação (conhecida desde os anos 60 como a crise de *software*) é ainda acrescida pelo facto de a produção de *software* (i.e. programação) não ser ainda tarefa de engenharia.

Técnicas verdadeiramente sistemáticas para o desenvolvimento de *software* controlável em tempo e orçamento são ainda um sonho. Muito progresso tem havido, mas ainda não é o suficiente.

Muito desse progresso tem sido conseguido recorrendo aos computadores para automação de algumas das tarefas do programador. Como meta, pode desejar substituir-se completamente o programador por uma máquina. Contudo, isso é teoricamente impossível. Com efeito, programar uma máquina formal é uma tarefa de formalização – a partir de um dado conjunto de requisitos informais o programador tem de desenvolver uma frase na linguagem formal de programação pretendida.

Sabe-se que as tarefas de formalização são difíceis. Até ao advento dos computadores, só os cientistas eram chamados ao desempenho dessas tarefas. A formalização exige muita criatividade e, ao mesmo tempo, uma grande dose de disciplina para usar o sistema formal pretendido. Aqui reside o cerne do problema.

O uso de sistemas computacionais para ajudar o programador (leia-se "formalizador") nas suas tarefas não tem produzido resultados satisfatórios. Antes das linguagens de alto nível e seus compiladores serem utilizáveis, o programador tinha de utilizar a linguagem máquina formal, de baixo nível. Hoje já não precisa de ir tão longe. No entanto, ainda tem de formalizar a solução usando alguma linguagem (ainda formal) de alto nível.

A ênfase actual nesta área consiste em apetrechar o programador com linguagens melhores e instrumentos mais adequados para o seu trabalho, esperando aumentar a sua produtividade e alargar a população de programadores, sem ser necessário o conhecimento de pormenores irrelevantes acerca das máquinas.

Espera-se que, no fim da década, a engenharia de *software* permita a produção de *software* isento de reparos do tipo "não nos responsabilizamos se não trabalhar como espera" que acharíamos ridículos e inadmissíveis em qualquer outro ramo da engenharia, mas que ainda constituem regra universal na área de *software*.

Finalmente, embora num futuro remoto, esperamos que diferentes aproximações à aprendizagem da máquina possam também contribuir para a solução da crise de *software*, fazendo diminuir a necessidade de intervenção humana na programação e manutenção de sistemas computacionais. Por outro lado, os chamados sistemas de bases de conhecimento parecem fornecer outra forma de programação de muito alto nível (usando a linguagem de representação do conhecimento, ainda formal) ao contrário de remover a sua necessidade.

Antes de terminar estes breves comentários sobre *software*, vale a pena recordar que cada computador universal é tipicamente chamado a executar muitos programas (isto é, chamado a imitar muitas máquinas específicas) até mesmo simultaneamente (repartindo o tempo dos seus recursos de computação). Na verdade, o computador típico encontra-se dotado de um sistema operativo e muitos outros elementos úteis (compiladores, por exemplo) o que faz dele uma máquina universal muito mais versátil e capaz de programação de nível muito mais elevado.

O progresso em sistemas operativos tem sido relativamente lento (comparado ao *hardware*), mas muito significativo. Entre os primeiros sistemas de multiprogramação e os primeiros sistemas distribuídos decorreram quase trinta anos. Num futuro próximo muito se espera das novas arquitecturas, quando as fronteiras tradicionais entre a gestão de processos e a gestão de memória quase se anularem através da gestão de objectos integrados. Uma fusão mais eficaz dos sistemas operativos e compiladores é um desenvolvimento correlativo.

5 Interacção

Usemos aqui a palavra *wetware* num sentido muito geral englobando todas as espécies de interface homem-máquina, isto é, englobando todas as espécies de instrumentos que suportam a comunicação entre o computador e os seus utilizadores humanos (a palavra foi originalmente forjada na literatura *cyberpunk*, para qualquer computador e/ou unidade de interface embutida no corpo humano).
As questões relativas à interface homem-máquina parecem merecer constituir uma categoria à parte. Os problemas são específicos, difíceis e deveras importantes. Os sistemas computacionais incluem, geralmente, alguma espécie de interface homem-máquina. Parte significativa do esforço de programação é-lhes dedicada. Um sistema computacional excelente mas com uma interface deficiente é inaceitável pelos seus potenciais utilizadores.

De um ponto de vista teórico, uma unidade de interface suporta alguma espécie de linguagem (até agora formal) com que o ser humano pode trabalhar. Inicialmente, as linguagens utilizadas com este objectivo eram de natureza textual, explorando o estilo das linguagens naturais do ocidente.

Ulteriormente, a ênfase tem-se deslocado para interfaces gráficas altamente interactivas (ainda formais) que requerem elevado poder computacional, grande quantidade de memória (uma imagem equivale efectivamente a 1000 palavras!) e grande esforço de programação. O último problema tem sido minorado com instrumentos de produtividade específica destinados a auxiliar a produção de *software* de interface.

Do ponto de vista do *hardware*, o progresso tem sido lento – por exemplo *workstations* completamente gráficas só agora se estão a tornar comuns. Espera-se que, num futuro próximo, sejam melhores, mais rápidas e suficientemente baratas para não constituirem barreira económica à projecção de sistemas. E as estações mutimédia devem tornar-se comuns num futuro próximo.

Numa linha muito mais especulativa, esperam-se saltos qualitativos no *hardware* da interface homem-máquina – veja-se o que se passa no sector da aviação relativamente às interfaces de pilotagem; vejam-se ainda as primeiras tentativas para obtenção de interfaces "químicas" em aplicações médicas de sistemas embutidos no corpo humano. Parece ser uma aposta segura esperar desenvolvimentos bastante espectaculares nesta área, algures no séc. XXI, mas não a curto prazo – na verdade, as interfaces actuais são bastantes primitivas, não só mercê das limitações da engenharia computacional, como também da carência de conhecimento sobre, por exemplo, os processos cognitivos do cérebro humano. Podem aparecer a curto prazo soluções simples, mas novas, para antigos problemas de interface, como por exemplo mecanismos de posicionamento que sigam o globo ocular do utilizador.

Outra vertente do problema da interface homem-máquina relaciona-se com a compreensão da linguagem natural, o reconhecimento do discurso e correspondentes operações de geração de voz. Ou seja, mais uma vez o problema da formalização. Com efeito, para reconhecer a linguagem natural o que procuramos é a máquina não-formal que seja capaz de trabalhar com uma linguagem não-formal (por exemplo o

inglês). Há mais de vinte anos que estes problemas têm estado no centro dos esforços da investigação no ramo das ciências da computação conhecido por inteligência artificial. Os resultados, até agora, estão longe de constituir uma alternativa séria às interfaces formais tradicionais, excepto em casos muito especiais e limitados.

A longo prazo, progressos qualitativos ao nível do *wetware* virão alterar completamente a face da engenharia de computadores como a conhecemos hoje – por exemplo, parte do que agora se resolve via *software* pode passar a ser resolvido via *wetware*. Por outro lado, o *wetware* virá a estar no centro das questões éticas com uma amplitude que a actual computação desconhece.

6 Normalização

As normas são essenciais ao desenvolvimento de qualquer indústria. A indústria de computadores não é excepção. Todos sentiram a sua falta ao tentar transferir uma aplicação de um computador para outro ou ao tentar mudar dados de um computador para outro.

Efectivamente, com excepções no domínio das linguagens de programação e protocolos de comunicação (baixo nível) o progresso do estabelecimento de normas em sistemas de computadores tem sido lento. Sob o ponto de vista científico e técnico este facto justifica-se, em muitos casos, para evitar normas prematuras sobre tecnologia subdesenvolvida. Mas, em alguns casos, o estabelecimento de normas tem sido evitado por interesses comerciais de alguns.

Num futuro próximo muito se espera na área dos sistemas operativos (até agora dominada por sistemas privados). Uma norma efectiva tornará possível a substituição das componentes de *hardware* de um sistema sem alterar os programas de aplicação. Facilitará também um trabalho de cooperação entre diferentes sistemas.

Também em *wetware* aparecerão futuramente alguns níveis de estabelecimento de normas. O utilizador típico não consegue compreender por que parece impossível encontrar duas aplicações diferentes com conjuntos de operações de interface idênticos, mesmo em aplicações bastante comuns como edição de textos.

7 Teorização

Do muito que acima se disse resulta claro que os sistemas de computadores actuais são máquinas de informação formais. Assim, é natural que muito do trabalho efectuado nos fundamentos matemáticos da computação se relacione com linguagens e sistemas formais.

É interessante recordar que a noção de uma máquina formal universal foi bem compreendida pelos matemáticos mesmo antes das primeiras tentativas de fabrico desse dispositivo terem sido bem sucedidas. Os matemáticos não desenvolveram esta noção tendo em mente possíveis aplicações, mas seguindo o programa de Hilbert para formalização da matemática. A noção de máquina formal universal surgiu naturalmente quando se tentou definir com precisão a noção de algoritmo. Os matemáticos procuravam então um algoritmo de prova completamente geral capaz em princípio de demonstrar ou refutar qualquer asserção matemática escrita numa linguagem adequada. As linguagens mais simples que pareciam suficientemente ricas para o objectivo em vista foram esboçadas no final do século XIX – as linguagens do cálculo de predicados de primeira ordem. Descobriu-se que este programa de formalização era uma quimera quando (durante a Segunda Guerra Mundial) Gödel provou que até mesmo a teoria (bastante simples) dos números inteiros apresentava asserções válidas que não podiam ser demonstradas por nenhum algoritmo de prova.

Deste esforço na área matemática pura (os fundamentos da matemática) muito de útil e relevante resultou para a engenharia de computadores. Por exemplo, os conceitos básicos de linguagem formal, de máquina e de algoritmo. Também o resultado de incompletude acima referido apontou cedo uma limitação importante dos sistemas formais. O primeiro desenvolvimento foi a teoria da computabilidade (decidibilidade) que visa concretizar o que é teoricamente computável (decidível) usando, tanto quanto necessário, uma máquina abstracta e usando o espaço necessário de armazenamento. É interessante recordar que, se essa máquina for suficientemente rica, para lá de um certo limiar, terá o mesmo poder que qualquer outra máquina do mesmo tipo – este postulado de Church foi verificado em todas as máquinas e sistemas formais propostos até agora.

Como exemplo prático, interessante (e por vezes esquecido) de um problema indecidível considere-se o problema de decidir se dado um programa qualquer a sua execução terminará. Procurar um algo-

ritmo para esse objectivo é tão inútil como procurar um código que ultrapasse os limites estabelecidos pelo teorema de Shannon da teoria da informação. Infelizmente, num ou noutro caso, não é impossível encontrar algum "engenheiro" que o tente mesmo assim. A teoria da computabilidade é actualmente uma área bastante desenvolvida, onde não se esperam progressos muito significativos.

Hoje, o interesse centra-se na teoria da complexidade que visa classificar os problemas computáveis reconhecendo a dificuldade da sua resolução. Por exemplo, em termos de tempo de computação e/ou espaço de memória. É claro que problemas decidíveis, mas cuja resolução pode levar toda a vida do universo, mesmo com um computador muito poderoso, são, para todos os efeitos práticos, intratáveis.

A classe de problemas mais tratáveis é a classe P de problemas que podem ser resolvidos em tempo polinomial (por exemplo, é muito fácil encontrar um algoritmo de ordenação que pode computar a solução num tempo proporcional a n^2, ou mesmo menos, sendo n o comprimento da lista a ser ordenada). Infelizmente, alguns problemas muito importantes não pertencem a esta classe, como é o caso do problema da prova lógica de primeira ordem. Contudo, muitos problemas desta natureza cabem numa categoria bastante interessante – a classe NP de problemas que podem ser resolvidos em tempo polinomial por uma máquina não determinista (grosseiramente, estes são problemas cuja solução é difícil de encontrar, mas, não obstante, é simples verificar se uma "solução" é de facto uma solução – como o ovo de Colombo). Se $P = NP$ ou não é ainda um problema em aberto. É impossível prever quando esta questão virá a ser respondida, se o for alguma vez.

Uma aplicação interessante da teoria da computabilidade insere-se na área da criptografia onde é muitas vezes necessário garantir que não existe um algoritmo prático de descodificação.

Outro desenvolvimento importante que começou no início dos anos cinquenta é a teoria das linguagens e autómatos que visa a caracterização das diferentes classes de linguagens formais e as classes correspondentes de máquinas capazes de as reconhecer. Esta teoria tem fornecido todo o suporte teórico para o desenvolvimento da área dos compiladores na engenharia de *software*. Como teoria está a ser progressivamente abandonada por se considerar concluída. Mas talvez o interesse recente em compiladores incrementais venha a motivar novos desenvolvimentos teóricos obviamente necessários.

Outra área de fundamentação da computação é a lógica. Desde muito cedo se reconheceu que os futuros sistemas de computadores deveriam ser capazes de, pelo menos, manipular teorias de primeira ordem. Em princípio, um sistema computacional armazenaria essa teoria e mantê-la-ia actualizada por interacção com os utilizadores. Ainda estamos muito longe disso. Utilizar a inferência lógica como operação básica de computação é dispendioso em termos de recursos computacionais. Só os surpreendentes desenvolvimentos a nível do *hardware* tornaram possíveis aplicações fragmentárias deste princípio.

Mas a lógica não contribui apenas com a ideia de olhar o computador como um sistema dedutivo – o recurso às lógicas como instrumentos da engenharia informática foi outro contributo importante. A engenharia informática tem vindo a precipitar o desenvolvimento de muitas lógicas para raciocinar sobre sistemas computacionais e seus programas – a lógica dinâmica e muitas outras variantes da lógica modal. Como tal, deu novo fôlego aos desenvolvimentos teóricos.

O interesse pela lógica matemática é agora grande e está muito distante das suas humildes e mal sucedidas origens na área dos fundamentos formais da matemática. Estão ainda a ser produzidos novos resultados interessantes e importantes na vasta área da especificação e verificação de sistemas, área de investigação ainda muito activa, enquanto se observou uma mudança de "asserções" para "teorias" como conceitos atómicos.

Outra área de fundamentos foi recentemente aberta – a álgebra universal e a teoria das categorias deram ambas notável contributo aos trabalhos mais recentes de semântica das linguagens computacionais, processos, modularização e reificação. Podemos contar com numerosos desenvolvimentos nestas frentes, para breve, que incluem uma melhor compreensão dos processos concorrentes (tão importantes para as máquinas paralelas agora em desenvolvimento).

A longo prazo, a visão lógica do computador como uma comunidade de sistemas dedutivos interactivos e a visão categorial da acção computacional como operação de composição de teorias podem mudar muito a maneira como se escreve o *software*.

No entanto, todos estes desenvolvimentos dos fundamentos matemáticos da computação parecem não ajudar o problema básico – no fim, esperamos ultrapassar as limitações dos sistemas formais construindo máquinas capazes de trabalhar com linguagens

não-formais (como o cérebro humano parece fazer tão bem). Se esta expectativa não é uma quimera, muito está ainda por concretizar, mesmo a nível teórico. E ainda não é muito claro por onde começar.

Finalmente, ainda importa notar que a física também é relevante para os fundamentos da computação. Na verdade, constrói-se uma máquina no nosso universo obedecendo às leis da física. Podemos, por exemplo, calcular o limite da velocidade de processamento de informação que se poderá aplicar a qualquer máquina de informação física, independentemente da base tecnológica utilizada. Por enquanto, estamos muito longe desse limite (pelo menos no que respeita aos computadores artificiais baseados no silício) pelo que ninguém está preocupado.

Mas outros constrangimentos físicos mais familiares como a velocidade de propagação dos impulsos eléctricos, dissipação de calor, etc, preocupam muito mais aqueles que trabalham na fronteira do actual *hardware*. E em breve a física quântica pode vir a ser mais relevante até para a teoria da arquitectura das futuras máquinas. Assim, parece que o domínio dos fundamentos físicos da computação está (ou pode vir a estar) a emergir.

De passagem, observaríamos ainda o grande impacto que a engenharia informática está a provocar nalguns ramos da matemática e da física, não só por fornecer um novo veículo para a experimentação, como por trazer alguns desenvolvimentos teóricos importantes. Os últimos já se tornaram evidentes no caso da matemática (eg., computabilidade, lógica dinâmica, lógica da especificação e teoria computacional das categorias). No caso da física parecem não estar a verificar-se já, mas no futuro (talvez não próximo) podemos esperar que a física da informação se torne uma importante área de investigação.

8 Aplicações

Para os leigos em engenharia de computadores, o progresso será naturalmente medido em termos de aplicações. Sente-se que estão para breve progressos importantes nas seguintes aplicações (representativas dos diferentes papéis do computador):

- Máquina de calcular: modelação e previsão de tempo;
- Máquina de comunicação e armazenamento de informação: banca sem papel;
- Máquina de controle: avião civil sem piloto;
- Máquina industrial: fábrica universal (isto é, completamente programável).

Referências

A natureza necessariamente especulativa deste artigo e o ponto de vista pessoal do autor nele reflectido não aconselham referências padrão. O leitor interessado pode encontrar diferentes pontos de vista sobre algumas das questões aqui analisadas, bem como outras em:

[1] Dertouzos, M. L. et al (1988).Trends in Computing, *Special Issue of Scientific American*

[2] Ashenhurst, R. e Graham, S. (eds) (1987), *ACM Turing Award Lectures -The First Twenty Years - 1966-1985*, ACM Press, Addison-Wesley Publishing Company.

[3] Penrose, R.(1989),*The Emperor's New Mind - Concerning Computers, Minds and The Laws of Physics*, Oxford University Press, Oxford.

Sobre o Autor

Amílcar Sernadas é Professor Catedrático do Departamento de Matemática, Secção de Ciência da Computação, do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa e lidera no INESC uma equipa de investigação que trabalha em projectos na área dos fundamentos lógicos e algébricos da computação, com vista a aplicações em CASE (especificações formais) e representação do conhecimento jurídico (lógica deôntica).

ASSOCIAÇÃO DOS ESTUDANTES DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Fundada em 11 de Dezembro de 1911

4 JOBSHOP

DE ENGENHARIA

Em Louvor da Química

J. J. R. Fraústo da Silva e A. Romão Dias

RESUMO

No presente artigo apresenta-se uma perspectiva de evolução da química inorgânica nos próximos anos, do ponto de vista pessoal (deliberadamente parcial) dos autores. A ênfase é posta na síntese de compostos organometálicos e dos elementos representativos e na sua crescente aplicação à catálise de reacções preparativas (industriais) importantes e ao desenvolvimento de materiais com propriedades de interesse relevante, designadamente ópticas, eléctricas (supercondutoras), estruturais (materiais de construção) ou químicas.

Presta-se também particular atenção a alguns processos químicos "bioinorgânicos", por exemplo, à fixação de azoto, à síntese directa de hidratos de carbono a partir de CO_2, à conversão do metano e do óxido de carbono em hidrocarbonetos, alcoois e aldeídos, ou à biomineralização, entre muitos outros, e à sua relação com os problemas ambientais, com a nutrição mineral, a regulação metabólica, a expressão genética, a morfogénese e mesmo a evolução biológica.

ABSTRACT

An overall perspective of the likely main developments of inorganic chemistry in the next few years is presented from the personal (biased) point of view of the authors. The emphasis is on the synthesis of organometallic or main group compounds with their expanding application to the catalysis of important industrial reactions or to the development of materials with properties of relevant interest, e.g. optical, electrical (superconducting), structural or chemical.

Particular attention is also paid to some "bioinorganic" processes, e.g. nitrogen fixation, direct synthesis of carbohydrates from CO_2, direct conversion of methane and carbon monoxide to hydrocarbons, alcohols and aldehydes or biomineralisation, amongst many others, and their relation to environmental problems, mineral nutrition, metabolic regulation, genetic expression, morphogenesis and biological evolution.

1

Pediu-nos a Técnica uma antevisão do desenvolvimento da química e da bioquímica nas próximas décadas, para se associar, em número especial, às comemorações do 80° aniversário do IST. A solicitação foi precisa; não se pretendia a história do passado nem a análise do presente (pelo menos de forma exclusiva); pretendia-se, sim, uma visão prospectiva da sua evolução, que permitisse aos jovens alunos desta Escola idealizar os cenários em que irão exercer a sua actividade profissional, quando dedicada às actividades de investigação e desenvolvimento no âmbito destas ciências.

Independentemente do questionável sucesso no cumprimento do objectivo que nos foi proposto, pelo menos dois óbices se põem à partida. Um, a vastidão do tema, a necessitar um estudo alargado de áreas que não dominamos ou a constituição de uma equipa numerosa cujo trabalho dificilmente poderia ser levado a cabo em tempo útil; outro, a inescapável subjectividade das escolhas a efectuar, mesmo na área limitada das nossas competências, que poderá levar-nos a menosprezar domínios que outros considerarão mais relevantes do seu ponto de vista.

Não se afigurando fácil tornear qualquer destas dificuldades, propomo-nos satisfazer o nosso compromisso centrando a atenção sobre a área que melhor conhecemos - a Química (e Bioquímica) Inorgânica - sem deixar de fazer algumas referências breves a tópicos que nos parecem óbvios noutras áreas, sobretudo aqueles que se justapõem ou se interligam com os referidos no âmbito daquela que consideramos central. Assim mesmo, temos de afirmar desde já, com a devida vénia para aqueles que não concordam connosco, que seremos provavelmente parciais nas nossas escolhas, mas não pedimos quaisquer desculpas pelo facto.

Parafraseando um conhecido químico (de quem esquecemos o nome mas não a ideia) a quem perguntaram o que é a Química analítica (e a resposta foi "Analytical chemistry is what analytical chemists do") diremos que a química (inorgânica) do futuro é aquela que mais nos agrada, no sentido porventura lúdico da participação na sua construção e porventura estético na apreciação do trabalho de outros...

Esperamos, de qualquer modo, que não se trate de um juízo muito limitativo, pois a nossa capacidade de deslumbramento é ainda bastante vasta...

Original recebido para publicação em 1 de Julho de 1991

2

Como dizia, não há muitos anos, o Prémio Nobel Roald Hoffman numa conferência da qual adaptámos o título neste comentário ("In praise of synthesis"), os "químicos fazem moléculas", e continuou: "fazem outras coisas também, claro - estudam as propriedades dessas moléculas, formulam teorias sobre a sua natureza e comportamento, as formas que apresentam, as substâncias a que dão lugar, as reacções em que participam e o mecanismo dessas reacções... Mas no âmago da sua ciência estão as moléculas, feitas pelos químicos ou existentes na Natureza; sem elas não há propriedade que possa ser estudada nem mecanismo que possa ser esclarecido".

Na sua tese, seria esta actividade criativa dos químicos, esta afinidade com o trabalho da própria Natureza, que aproxima a Química da Arte mais do que qualquer outra ciência; é uma actividade que, como a dos escritores, pintores, escultores, compositores e arquitectos, seduz esteticamente pela beleza da construção e impressiona pela harmonia do objecto produzido.

Por inclinação pessoal não podemos, assim, deixar de colocar à cabeça das nossas preferências a feitura de moléculas, sejam elas novas moléculas com propriedades inesperadas, inusitadas ou melhoradas, ou moléculas conhecidas, obtidas por métodos mais simples, mais elegantes ou mais económicos, e entre estas aquelas que a Mãe Natureza produziu com a sua mestria química apurada durante alguns milhares de milhões de anos.

Aqui cabe toda a química orgânica preparativa - uma área do passado, do presente e do futuro -, naturalmente com algumas modas, como sejam a síntese assimétrica estereoselectiva, imitando a Natureza e procurando obter compostos biologicamente activos, úteis, por exemplo, como produtos terapêuticos. A síntese total de produtos naturais é um domínio ainda mais abrangente, bem como a análise, obviamente essencial e prévia, incluindo a extracção e identificação dos produtos naturais, sobretudo aqueles que aparentam possuir propriedades úteis. Neste ponto valerá a pena abrir um parentesis para referir novas técnicas e novos instrumentos auxiliares relevantes. Entre as primeiras, a electroquímica molecular e a utilização preparativa de reacções fotoquímicas começam a ter uma presença significativa. Entre os segundos, para além do desenvolvimento permanente das possibilidades de elucidação estrutural, há que referir a explosão das tecnologias da informação neste domínio, quer na obtenção e processamento de dados, quer na simulação de estruturas e suas dinâmicas ("molecular graphics"), quer ainda na orientação das sínteses ("computer aided synthesis").

Quanto a compostos novos, o céu é o limite, e para além dos múltiplos desenvolvimentos a que a procura de propriedades melhoradas sempre leva (novos medicamentos ou produtos biologicamente activos obtidos tendo em conta as relações estrutura-actividade, novos materiais mais resistentes à temperatura e a reacções químicas, polímeros condutores ou que aumentam de volume quando expandidos, etc. há um crescente interesse na química de outros elementos "não orgânicos", como o boro e o fósforo, mas também o silício, o germânio, o arsénio, ou o flúor, senão mesmo o próprio carbono elementar, com uma química emergente e espectacular, bem patente na obtenção de cachos ou agregados ("clusters") como o C_{60}, apropriadamente designado por "futeboleno", cuja estrutura imediatamente sugere a aplicação como lubrificante (recordar o caso da grafite), e muito recentemente de vários outros como C_{70}, com uma forma de bola de rugby, e C_{78} também elipsóide. Os desenvolvimentos já conseguidos em anos recentes na química dos chamados elementos representativos - com relevo para o caso do boro - foram de tal ordem que puseram em causa as

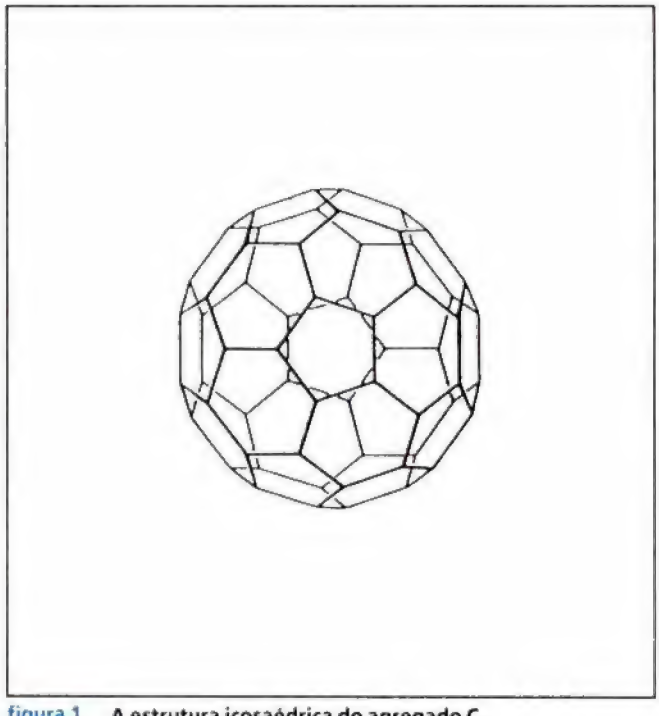


figura 1 A estrutura icosaédrica do agregado C_{60} ("futeboleno"), pertencente à família dos buckminsterfulerenos

teorias da ligação química aceites até há poucos anos. Dogmas centrais como a tetravalência do carbono ou a monovalência do hidrogénio foram refutados com exemplos de carbono penta, hexa e até octa-coordenado, hidrogénio atómico hexa-coordenado ou hidrogénio molecular coordenado, como também fósforo heptacoordenado e azoto pentacoordenado. Quem pensaria também que dois não metais como o enxofre e o azoto se poderiam combinar para dar um composto "metálico", supercondutor a temperaturas muito baixas, o politiazil $(SN)_x$, que os gases "nobres" (antes "inertes") dariam lugar a centenas de compostos, que compostos fluorados dariam polímeros particularmente resistentes e fluidos com grande poder dissolvente para gases como o O_2, que seria possível obter cadeias, cachos, anéis e até mesmo anéis interligados (catenanos) de elementos variados? Quem ousaria falar de química supra-molecular há uma escassa dezena de anos? E de ligações triplas C≡As ou C≡P há menos de cinco anos?

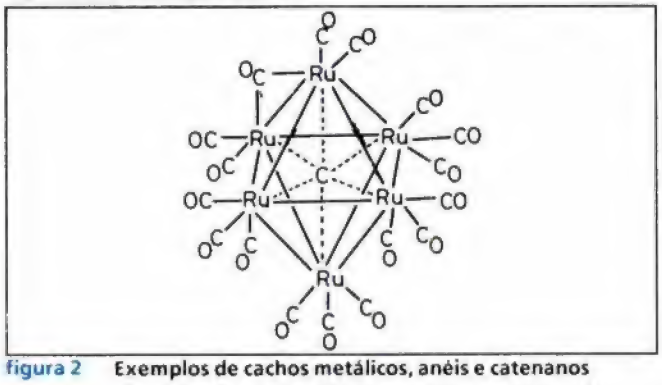


figura 2 Exemplos de cachos metálicos, anéis e catenanos
a) cacho de ruténio tendo no centro um átomo de carbono hexacoordenado

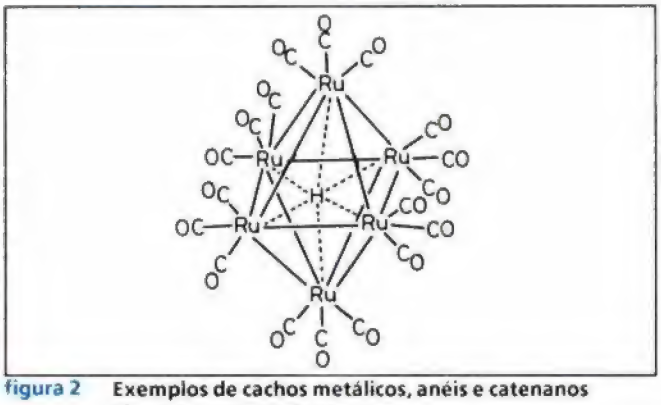


figura 2 Exemplos de cachos metálicos, anéis e catenanos
b) cacho de ruténio tendo no centro um átomo de hidrogénio hexacoordenado

Todos estes são desenvolvimentos das últimas duas décadas, traduzindo um verdadeiro ressurgimento da química preparativa dos não metais. Se recordarmos que entre os primeiros cinquenta compostos utilizados em grande escala na indústria moderna apenas um contém um metal de transição (o TiO_2), poderemos avaliar o impacto que este trabalho virá a ter no futuro. Arriscaremos pouco dizendo que a química preparativa dos não metais e o estudo das propriedades e

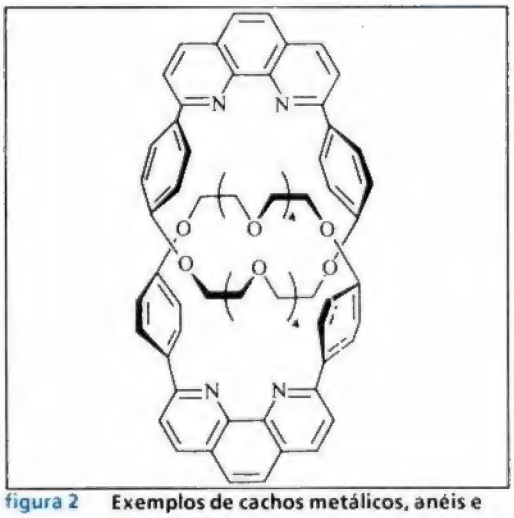


figura 2 Exemplos de cachos metálicos, anéis e catenanos
c) catenano, um composto com dois anéis entrelaçados que se coordena a iões metálicos

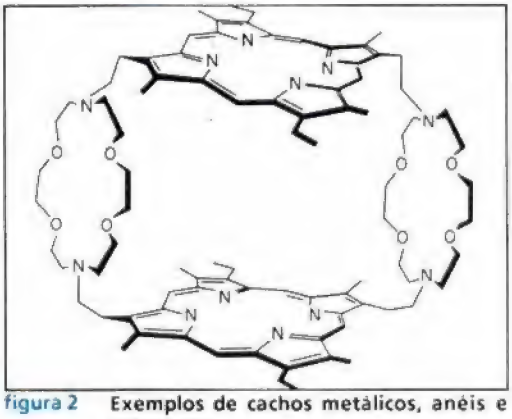


figura 2 Exemplos de cachos metálicos, anéis e catenanos
d) Polimacrociclo, um anel contendo dois macrociclos porfirínicos e dois macrociclos tetra-oxa diaza

potenciais aplicações dos muitos novos compostos obtidos será certamente uma das linhas marcantes no futuro. Desde já a preparação de cerâmicas de terras-raras e outros metais, supercondutoras a temperaturas elevadas (em relação ao zero absoluto), tais como $YBa_2Cu_3O_{6+x}$, desperta as atenções (e ambições) mundiais. O maior problema será fabricar fios flexíveis com tais condutores, mas já foram anunciados, muito recentemente, os primeiros êxitos (relativos).

Deixámos-nos arrastar insensivelmente para o campo que há escassas duas décadas parecia mais despido de interesse para os químicos inorgânicos como nós, formados na época áurea dos metais de transição, dos complexos, dos compostos organo-metálicos, das teorias da ligação química bem sucedidas, da euforia dos or-

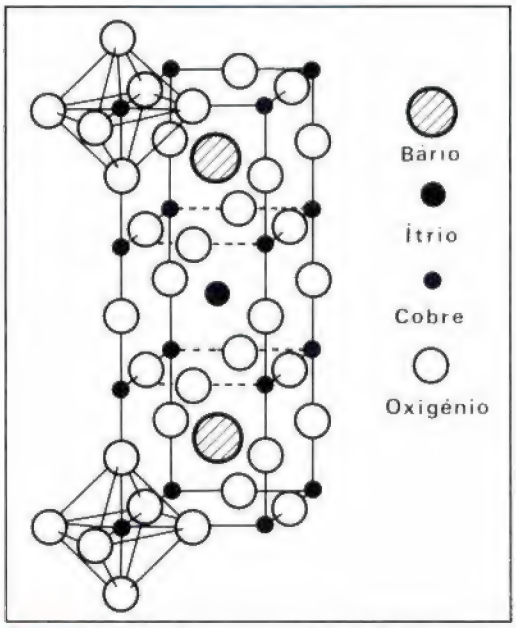


figura 3 Cerâmica supercondutora, óxido mixto correspondendo à composição $YBa_2Cu_3O_{6+x}$

bitais atómicos e moleculares, do desenvolvimento da espectroscopia molecular e de ressonância protónica e electrónica, etc. que permitiu o que foi apelidado de "renascimento" da química inorgânica após a 2ª Grande Guerra Mundial, quando o número de artigos científicos neste domínio representava apenas uma fracção mínima do total de artigos publicados nas revistas da especialidade.

A familiaridade com a química dos metais derivada de projectos relacionados com a defesa (e veja-se a analogia com o mais recente projecto da "guerra nas estrelas", com impacto noutras áreas estratégicas), o maior apoio financeiro dos governos convencidos das vantagens da investigação fundamental, a criação de grandes laboratórios nacionais de investigação em diversos domínios (p.exemplo, das aplicações de energia nuclear) e, talvez acima de tudo, a elevada qualidade, motivação e, em muitos casos, experiência dos estudantes graduados deste período pós-guerra, empenhados em recuperar o tempo perdido, proporcionaram as condições para um desenvolvimento acelerado da nova química, com ênfase no estudo dos compostos de coordenação e compostos organo-metálicos.

Na sequência do trabalho preparativo pioneiro de A. Werner e C.K. Jorgensen e de N. Bjerrum no estudo de equilibrios em solução, sobressairam então as escolas americana de J. Bailar, na Universidade da Califórnia em Berkeley, dinamarquesa de J. Bjerrum em Copenhague, a sueca de L.G. Sillen, de S. Ahrland e I. Leden, a suiça de G. Schwarzenbach, a italiana de L. Malatesta e L. Sacconi, a inglesa de J. Chatt. R.S. Nyholm (vindo da Austrália, da escola de F.P. Dwyer e D.P. Mellor), H.M.N.H Irving e o seu discípulo R.J.P. Williams, para além de muitos teóricos como C.T. Ballhausen, C.K. Jorgensen, H. Hartman, L. Orgel e acima de todos, como sombra tutelar, Linus Pauling. Por seu lado, e na sequência destes, F. Basolo, R. Pearson, H. Taube, M. Sargeson e M. Eigen, além de muitos outros, desenvolveram, até ao ponto de constituir quase um domínio autónomo, o estudo dos mecanismos reaccionais em compostos de coordenação. Os trabalhos destes autores e seus discípulos, bem como de muitos outros cientistas de apreciável nomeada, dominaram a literatura da química inorgânica até aos anos 60-70; a preparação dos compostos de coordenação e o estudo das suas propriedades químicas, ópticas, magnéticas, electrónicas, estruturais, termodinâmicas e cinéticas, praticamente ofuscaram toda a restante química inorgânica e relegaram mesmo para segundo plano a química orgânica e a química física, sobretudo devido aos desenvolvimentos teóricos que proporcionaram (teoria da ligação de valência e dos orbitais moleculares, do campo cristalino e do campo dos ligandos).
A partir dos anos 60, porém, o tema começou, aparentemente, a esgotar-se nos seus aspectos mais imediatos ainda que a extensão dos mais usuais doadores oxigenados e azotados, normalmente escolhidos, a outros contendo, por exemplo, arsénio e fósforo, e a substituição da água por outros solventes tenha permitido novos e inesperados desenvolvimentos. O mesmo se pode dizer do alargamento do estudo dos metais à segunda e terceira séries de transição.

Começou simultâneamente a expandir-se um domínio conexo, de alguma forma na continuidade da química dos compostos de coordenação, que foi a química dos compostos organometálicos, isto é, com carbono directamente ligado aos metais. Sobressaiem aqui E.O. Fisher na Alemanha, F.A. Cotton nos EUA e J. Lewis e G. Wilkinson em Inglaterra, para além de muitos outros. O seu trabalho deu origem a um dos mais espectaculares desenvolvimentos da química inorgânica moderna, com profundas implicações nas teorias da ligação química e novas possibilidades de aplicação industrial que ultrapassaram largamente as abertas pelo estudo dos compostos de coordenação clássicos.

A primeira fase deste trabalho foi, uma vez mais, largamente preparativa, mas empírica; o desafio era fazer compostos novos explorando todas as possibilidades de combinação de átomos metálicos com moléculas orgânicas, alquilos, arilos, olefinas, etc., além de diversas moléculas (ou átomos) que, não sendo propriamente orgânicas, dão origem a compostos seme-

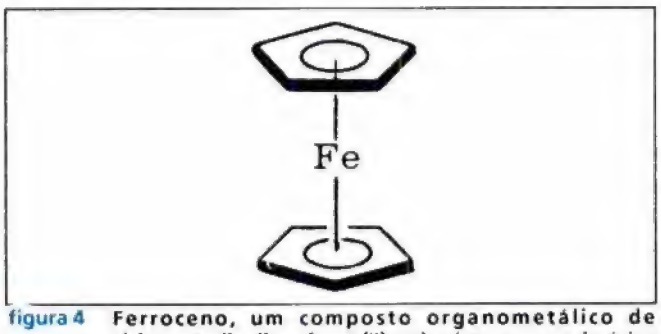


figura 4 Ferroceno, um composto organometálico de ciclopentadienilo e ferro (II), cuja síntese nos princípios dos anos 50 deu origem à química organometálica moderna

lhantes aos organometálicos, como sejam, por exemplo o CO, as fosfinas e o hidrogénio.

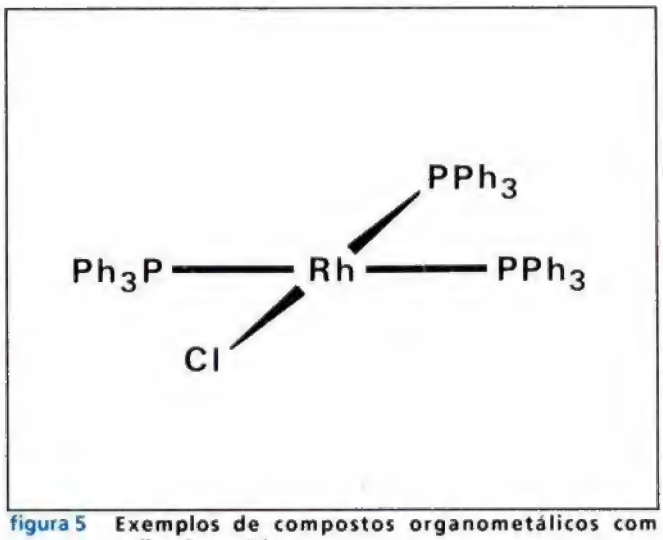


figura 5 Exemplos de compostos organometálicos com aplicações práticas
a) Clorotris (trifenilfosfina) ródio, o famoso catalisador de Wilkinson (i), que é muito eficiente em meio homogéneo na hidrogenação selectiva de olefinas.
Quando modificado passando a conter a fosfina quiral DIPAMP (ii) é muito usado na síntese de L-Dopa (iii), um medicamento usado no tratamento da doença de Parkinson (processo Monsanto).

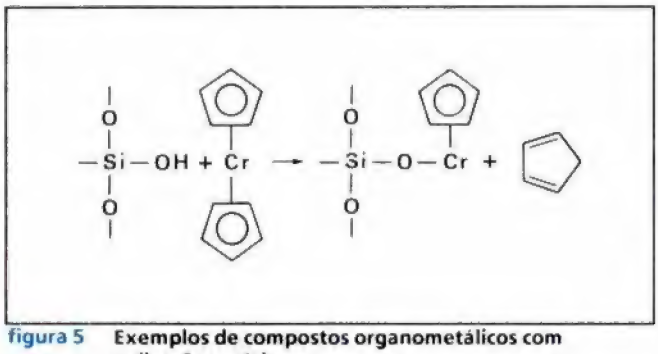


figura 5 Exemplos de compostos organometálicos com aplicações práticas
b) Catalisador para polimerização do etileno resultante da interacção do cromoceno com um suporte de sílica (processo da Union Carbide).

Todavia, a crescente disponibilidade de equipamento para estudos espectroscópicos e estruturais directos, e o princípio de sistematização que a riqueza de dados acumulados permitiu, tornaram a actividade prepara-

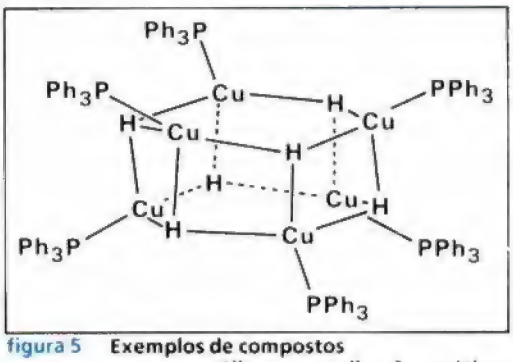


figura 5 Exemplos de compostos organometálicos com aplicações práticas
c) Hidrato de trifenilfosfinacrobe (I) (hexâmero), um novo composto organometálico com hidrogénio tri-coordenado que é um agente redutor régio-selectivo para carbonilos α,β-insaturados.

tiva mais selectiva, pondo-a ao serviço de novas e excitantes descobertas, tanto do ponto de vista teórico como aplicado, por exemplo a obtenção de compostos com ligações múltiplas (duplas e triplas) metal-carbono, a síntese de famílias de compostos visando elucidar problemas estruturais ou de reactividade e a preparação de compostos"feitos à medida" para determinadas aplicações industriais.

Progressivamente, já na última década, foi-se tomando consciência das potencialidades destes compostos, da sua reactividade e respectivos mecanismos reaccionais, tendo-se muitos deles revelado como catalisadores extremamente interessantes para a indústria do petróleo (em reacções de "cracking", "reforming", hidrodessulfuração e hidrodesnitrificação dos petróleos brutos), em reacções de hidrogenação simples e assimétrica, na conversão do CO em metanol, em reacções de polimerização estereo-específicas e em reacções de síntese assimétrica. Esta área, da catálise homogénea e heterogénea com compostos organometálicos (e não só), continuará a ser, em nossa opinião, uma das mais aliciantes e sugestivas dos anos que se avizinham. Casos não resolvidos, por exemplo a conversão directa do metano em etileno, etano ou outros hidrocarbonetos mais pesados, a oxidação directa deste mesmo gás, como o fazem as metano-oxigenases, a ciclotrimerização do etileno a ciclohexano, a inserção de azoto em hidrocarbonetos insaturados, etc., são desafios que permanecem para o futuro.

Ao mesmo tempo que se desenvolvia, a química dos compostos organometálicos

reaproximava-se, como vimos no caso dos hidretos, carbonilos e agregados metálicos, da química dos compostos de coordenação clássicos, esbatendo-se fronteiras, na realidade artificiais, que dificultavam a generalização das teorias e a explicação dos comportamentos.

O futuro mostrará decerto uma ênfase acrescida na utilização de ligandos atípicos da química organometálica, não só o hidrogénio, o fósforo e o arsénio mas também, provavelmente, o enxofre. Na verdade, crê-se que foram certos sulfuretos de metais de transição que, na biologia primitiva, terão tido o encargo de realizar essa mesma química actuando sobre as moléculas pequenas contendo os elementos básicos essenciais à vida - o H_2, o N_2, o CH_4, o CO... Este é outro domínio ainda em aberto, no qual haverá que esperar grandes desenvolvimentos.

Não é só no domínio da catálise que a química organometálica oferece interesse dos pontos de vista teórico e das aplicações. As novas substâncias preparadas têm, com frequência, propriedades pouco comuns que podem ser exploradas industrialmente. A preparação de filmes metálicos ultrafinos, de materiais com propriedades pouco comuns, por exemplo fibras ópticas e outros materiais com propriedades ópticas anisótropas ou com propriedades eléctricas ou magnéticas anómalas, são outras possibilidades em aberto. Os estudos do estado sólido, tanto neste como no domínio dos compostos de elementos representativos, são mais uma área do futuro, desta vez no âmbito da química-física, a aguardar novas aventuras exploratórias. Muito será de esperar, diga-se desde já, do estudo de sólidos (e fluidos) em condições extremas de pressão e temperatura. Por exemplo o rubidio e o césio, que são metais alcalinos, comportam-se sob pressão elevada como metais de transição, e o iodo, que é um não metal, comporta-se como um metal...

Enquanto que muitos dos dissidentes da química dos compostos de coordenação, aparentemente esgotada na sua capacidade inovatória, juntaram esforços com químicos orgânicos, igualmente descontentes, e abriram as portas da nóvel química organometálica dos anos 60, rompendo desde logo com a omnipresença da água nos seus sistemas reaccionais, outros, inconformados, mantiveram-se na mesma linha e procuraram antes utilizar ligandos "clássicos" mais complicados. Dos aminoácidos aos polipeptideos e destes às proteinas foi um salto e subitamente encontraram-se igualmente associados ao grupo dos bioquímicos também insatisfeitos com a restrição das suas preocupações aos compostos dos elementos básicos da química orgânica, - C, H, N, O e mais raramente, enxofre e fósforo (só como fosfato). A vida não podia ser tão simples e era evidente que outros elementos "não orgânicos" jogavam um papel fundamental - o sódio e o potássio, o cálcio e o magnésio, desde logo, mas também o ferro, o cobre, o zinco e o manganês, mas também o cobalto, o níquel e até o molibdénio...

Em resumo, abria-se uma nova área plena de promessas, se não de aplicações industriais óbvias pelo menos de clarificações fundamentais e apaixonantes - a química bioinorgânica - com fronteiras óbvias com a nutrição mineral, com a toxicologia, com estudos de evolução química e até, nos dias que correm, a cruzar-se, de forma excitante, com a morfogénese, com a regulação metabólica, com a expressão genética, com a evolução biológica e, naturalmente, com a química ambiental, todas questões para as próximas décadas.

Muito do trabalho realizado no âmbito desta química bioinorgânica centrou-se no estudo de "modelos" de moléculas e sistemas biológicos contendo metais, tentando simular o comportamento real "in vivo" dessas substâncias. A área diversificou-se e especializou-se consideravelmente. Alguns investigadores dedicaram-se ao estudo de sistemas fixadores de diazoto, simulando as reacções da nitrogenase; outros dedicaram-se ao estudo de transportadores de oxigénio como a hemoglobina; outros à catálise ácido-base envolvendo modelos de metalo-enzimas; outros ao mecanismo de produção de oxigénio na fotossíntese; outros aos mecanismos de captura, armazenamento e transdução de energia; outros ao estudo das trocas sódio-potássio em membranas, base das mensagens nervosas; outros à transferência electrónica; outros às reacções de bio-halogenação e bio-metilação, etc., etc., etc.,. Praticamente, um mundo novo, um não acabar mais de possibilidades e ideias, uma ciência tão grande como a própria vida que lhe serve de base e justificação. Seria impossivel citar todos seus apóstolos e limitamo-nos a referir um, R.J.P. Williams, da Universidade de Oxford, por razões de preferência pessoal, pela forma como encara o domínio como um todo interrelacionado e o aborda experimentalmente de forma directa, não através de modelos que distorcem a realidade e suscitam frequentemente mais dúvidas do que fornecem como explicações.

A listagem de temas que acima se fez, e a que haverá adicionar alguns outros, como o estudo da biomineralização (com implicações directas na ciência dos mate-

riais), corresponde sensivelmente aos grandes temas do futuro nesta área.

É necessário aprofundar o nosso conhecimento sobre a forma como os elementos químicos são utilizados pelos sistemas vivos, pois desse conhecimento, fundamental em si próprio, poderão advir sugestões e ideias de aplicações de maior interesse - novos medicamentos, novos materiais, novos processos para obter produtos essenciais, melhor compreensão dos problemas ambientais e consequente possibilidade de intervir nos mesmos.

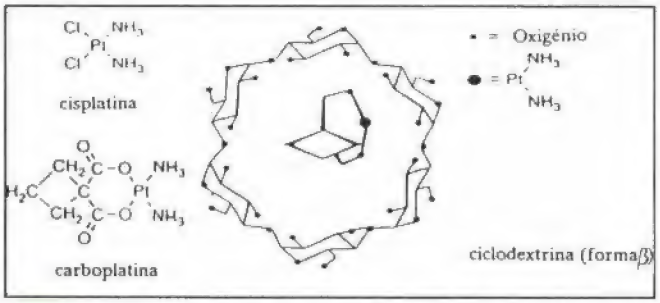


figura 6 O composto cisplatina foi o primeiro medicamento contendo este metal proposto para a terapia do cancro do ovário. Um composto análogo -carboplatina- é menos tóxico e, portanto, mais conveniente, mas ainda relativamente pouco solúvel. A sua inclusão em moléculas de ciclo dextrina (forma β) aumenta consideravelmente a solubilidade, permitindo elevar a concentração das doses e diminuir a sua frequência

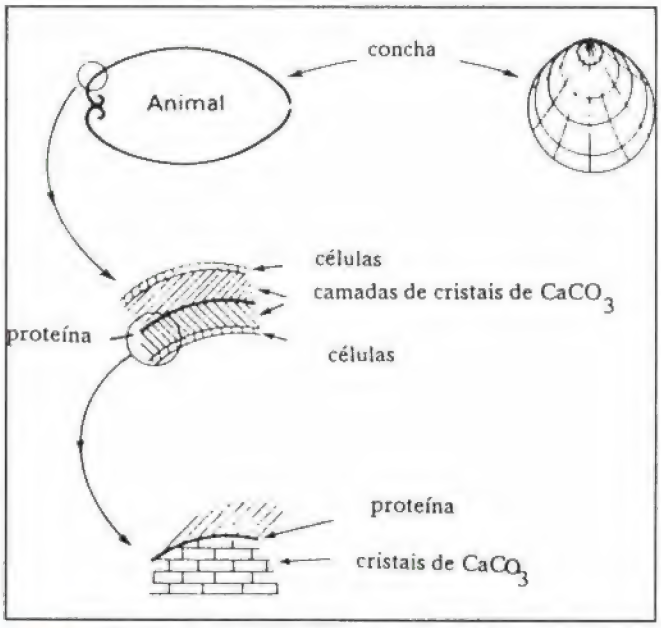


figura 7 Concha de um bivalve, por exemplo uma ameijoa, mostrando na ampliação o arranjo das camadas de cristais de carbonato de cálcio e de proteina que serve de matriz organizadora e distribuidora das tensões, aumentando consideravelmente a resistência do conjunto.

Alguns exemplos, escolhidos ao acaso para cada tema, poderão ilustrar a vastidão de possibilidades em aberto. Veja-se, por exemplo, o uso do lítio no tratamento de doenças maníaco-depressivas, para o qual poderá haver alternativas mais seguras, e o de certos compostos de platina no tratamento do cancro, devido à sua interacção com o DNA, que carece ainda de aperfeiçoamentos diversos; note-se o desenvolvimento de materiais estruturais "compositos" de grande resistência, análogos aos utilizados nas conchas de bivalves (proteínas e cristais de carbonato de cálcio); atente-se na importância de que se reveste a descoberta de compostos que possam realizar a fixação e redução do diazoto atmosférico em condições suaves para adubagem directa e não poluente dos solos; repare-se no interesse industrial e económico da conversão directa do metano e do monóxido de carbono em alcoóis, aldeidos e hidrocarbonetos mais pesados, e no da síntese directa de hidratos de carbono a partir do CO_2, como fazem as plantas. Numa linha diferente, veja-se como se torna urgente a compreensão global do problema das "chuvas ácidas" e o da produção e regulação do CO_2 atmosférico, um dos responsáveis pelo "efeito de estufa", ambos ligados ao consumo de combustíveis fósseis, ou como é necessário esclarecer o contributo da microflora marítima na produção de hidrocarbonetos halogenados voláteis, bem como a interacção destes com a camada de ozono na atmosfera, que poderá levar a questionar a adopção de medidas restritivas drásticas na utilização de compostos análogos industriais, porventura insuficientemente justificadas. Todas estas são questões para as quais uma melhor compreensão do papel dos elementos químicos em biologia poderá dar respostas fundamentais. Esta é, certamente e uma vez mais, uma área de futuro.

3

Traçámos, de uma forma muito genérica e superficial, um quadro de possibilidades que, esperamos, dará uma ideia do que os futuros químicos investigadores têm pela frente, a aguardar o seu esforço e criatividade. Não se pretendeu nem nos seria possível, como dissémos, fazer uma análise exaustiva.

Muitos aspectos importantes ficaram de fora, por esquecimento, por desconhecimento, por juízos de valor relativo, por preferência pessoal. A química dos macrociclos poli-éter e poli-aza, por exemplo, que conheceu alguma voga nos últimos anos, não foi referida especificamente por

se entender que cabe no âmbito das áreas mais vastas da química dos elementos de transição e dos elementos representativos e está também em parte contida no domínio da química bioinorgânica. O mesmo se pode dizer da química dos compostos de inclusão, dos "calixarenos", dos zeolitos e de outros catalizadores ácidos sólidos, hoje tão particularmente interessantes por obviarem a alguns problemas de poluição.

Também a química analítica não foi expressamente incluída, ainda que esteja subjacente a todos os domínios considerados, muito particularmente à área da química bio-inorgânica e às áreas fronteiriças da nutrição, toxidade e química ambiental em geral. A necessidade de levar ainda mais além os limites de detecção e a fiabilidade das determinações, a importância da certificação de padrões rigorosos de pureza, por exemplo no domínio da química do estado sólido em que um átomo de um elemento estranho em 10^9 átomos de outro elemento pode modificar radicalmente as propriedades deste (o que corresponde a admitir que um só estrangeiro em toda a China poderá mudar, completa e subitamente, a língua do país e o comportamento do seu povo ...), são questões suficientemente óbvias para carecerem de ênfase particular.

No presente artigo referimos especificamente algumas áreas que pensamos virem a ter um peso e expressão significativos no futuro, dentro dos condicionalismos que indicámos à partida - áreas que nos agradam, áreas que nos atraem cientificamente, ludicamente ou esteticamente e que, por essa razão, considerámos importantes.

Muito mais áreas poderiam, sem dúvida, ser acrescentadas e muitas surpresas, decerto, nos aguardam noutras de que nem sequer suspeitamos agora. Vejam-se os desenvolvimentos ocorridos em escassos trinta anos, atente-se na disponibilidade de instrumentação sofisticada surgida já durante o período da nossa vida activa (recordemos que alguns dos nossos mestres apenas viram um simples medidor do pH no final das suas carreiras...) e seremos obrigados a concluir que a química está ainda, afinal, na sua infância ...

E quem ficará surpreendido com esta afirmação se à nossa volta se assiste à exuberante demonstração da existência de uma química muito mais requintada, desenvolvida sem dificuldade aparente por espécies até muito inferiores na escala evolutiva, como as bactérias? É longo ainda o caminho a percorrer até que possamos aproximar-nos minimamente da sua competência experimental... E isto sem referir já as possibilidades de desenvolvimento de outras químicas, não biológicas e por isso menos limitadas.

Como dizia, recentemente, Christian Jorgensen, "Chemistry is exuberant and novel phenomena are largely umpredictable".

Esta imprevisibilidade, mais aliciante que inquietante, deixa-nos tranquilos quanto ao rigor das nossas despretenciosas considerações. Se assim mesmo elas contribuirem para que alguns dos agora jovens futuros químicos comecem a sonhar, consideraremos atingido o nosso objectivo.

Sobre os Autores

J. J. R. Fraústo da Silva e A. Romão Dias são Professores Catedráticos do Departamento de Química, Secção de Química Analítica, do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Investigação Operacional: Ano 2000

Luís Valadares Tavares

RESUMO

Nesta nota o autor perspectiva a evolução recente da Investigação Operacional a fim de deduzir as suas principais potencialidades face às Ciências e às Técnicas de Engenharia no dealbar do próximo século.

ABSTRACT

The recent evolution of Operational Research and likely developments for the next ten years are discussed in this paper with a special focus on the applications to Engineering.

1 Investigação Operacional: tendências actuais.

A Investigação Operacional surgiu no final da 2a. Guerra Mundial como uma metodologia inter-disciplinar baseada na teoria geral dos sistemas e visando apoiar os processsos de informação e decisão (ver, por exemplo, [1, 4, 8]).

O seu espaço natural é o domínio de quem escolhe, procurando-se compreender o comportamento dos sistemas organizacionais, identificar as suas relações com o meio onde se integram, caracterizar ou prever as variáveis não controláveis a que estão sujeitos, analisar todos os instrumentos de intervenção disponíveis, aperfeiçoar ou optimizar opções estratégicas, tácticas ou operacionais, sempre com a finalidade de aproximar o comportamento dos sistemas em causa de padrões ou valores paradigmáticos bem conhecidos.

Tal como seria previsível, o desenvolvimento da Investigação Operacional foi sempre muito condicionado pelos apoios científicos e técnicos disponíveis ao longo deste meio século de evolução, contribuíndo também, por seu lado, para importantes desenvolvimentos:

1.1 Meios informáticos

Tratando-se de uma metodologia que estuda sistemas complexos (fábricas, empreendimentos, organizações, processos de produção, estruturas ocupacionais, estabelecimentos urbanos, etc.) é essencial dispôr de informação actualizada e objectiva que permita conceber e estimar os modelos melhor adoptados aos objectivos propostos. Assim se compreende que desde o seu início, a história da Investigação Operacional esteja directamente ligada à dos meios computacionais.

À recolha e ao tratamento de grandes volumes de dados de modo centralizado tão ao gosto dos vendedores de máquinas da década de sessenta, sempre a Investigação Operacional contrapôs filosofias mais distribuídas que só vieram a ser adaptadas posteriormente pelos principais produtores de equipamentos mais ou menos conspícuos. As vantagens dos meios micro-computacionais foram desde início compreendidas pela Investigação Operacional não só pelo seu potencial técnico mas principalmente, por permitirem ultrapassar o fosso tradicional "Centro de Cálculo <-> Utilizador" apesar do desdém com que foram recebidos pelos especialistas de sistemas mais potentes. É interessante notar que mesmo no IST esta dificuldade de percepção atrasou o apetrechamento dos departamentos que, paradoxalmente, mais experiência tinham de grandes sistemas.

A nossa lógica de utilização do sistema informático sempre tem sido a de representar o problema de modo a obter soluções o que veio agora a encontrar eco na comunidade informática com o mote de procurar fornecer soluções em vez de equipamentos.

1.2 Modelos estatísticos

As ciências estatísticas desenvolveram-se inicialmente no século XVIII e XIX em articulação directa com o grande desenvolvimento das ciências experimentais para responder aos seus desafios de inteligibilidade dos fenómenos estudados.

A Investigação Operacional recuperou esta tradição evitando-se a influência exagerada da abordagem lógico-dedutiva menos interessada na experimentação.

A simulação numérica probabilística tem permitido novos desenvolvimentos no domínio da inferência estatística, do projecto de experiências e da modelação de processos estocásticos.

1.3 Ciências Organizacionais

A evolução feita pelas teorias organizacionais desde a abordagem mecanicista

Original recebido para publicação em 30 de Outubro de 1991

da escola de Taylor tem vindo a sublinhar a importância da componente estrutural das organizações. Esta importância é reconhecida não só pela escola estruturalista mas também por outras como a behaviourista ou a sistémica [5].

É, porém, esta última abordagem que presentemente melhor descreve a realidade complexa e dinâmica das organizações no seu todo comportamental e não apenas na análise das suas componentes elementares. Ora, é evidente que a eleição do conceito de sistema para representação básica das organizações estabelece grande proximidade metodológica com a Investigação Operacional que assim reencontra nas Ciências Organizacionais a sua linguagem e o seu estilo de abordagem tendo vindo a poder apoiar o desenvolvimento destas ciências durante os últimos vinte anos com assinaláveis formas de enculturação e aculturação.

A Investigação Operacional surge assim, actualmente, como uma metodologia de apoio a decisões desenvolvidas em espaços organizacionais mais ou menos complexos, considerando as suas dimensões aleatória, incerta ou combinatória e dando especial atenção aos recursos utilizados e aos resultados esperados para cada alternativa.

2 Investigação Operacional: Cenário 2000

As condicionantes já referidas e os próprios vectores internos de progresso da Investigação Operacional permitem antecipar novas potencialidades e facetas a revelar até ao início do próximo século:

2.1 Da experimentação de Monte-Carlo à simulação adaptativa.

A experimentação numérica incorporando processos aleatórios ou estocásticos através das conhecidas técnicas de Monte-Carlo é, sem dúvida, uma das contribuições mais importantes da Investigação Operacional. Todavia, a sua utilidade tem sido muitas vezes limitada por uma exagerada atomização da descrição dos sistemas, por uma excessiva simplificação das suas características ou ainda por dificuldades computacionais.

Atendendo a que os próximos anos vão proporcionar sistemas de informação e de computação cada vez mais eficientes e interactivos será possível desenvolver representações também mais perfeitas. Estes novos modelos terão de ser fundamentados em resultados inovadores no que respeita às suas lógicas, quer predicativas, quer relacionais, e terão de representar de forma integrada os diferentes níveis de informação, da incerteza à certeza.

A simulação dos sistemas permitirá então estudar não apenas os efeitos desta ou daquela decisão estática mas sim, esperançosamente, representar comportamentos decisórios dinâmicos os quais se caracterizam mais pela adptatividade do que pela estaticidade. Esta evolução implicará que as actuais bases de dados evoluam no sentido de passarem a ser autênticas bases integradas de conhecimentos e ainda que os modelos de simulação venham a conter representações mais dinâmicas dos próprios processos de decisão o que, obviamente, deverá tirar partido dos actuais sistemas periciais.

2.2 Da optimização de sistemas limitados ao estudo de sistemas abertos

O modelo básico de sistema considerado pelos métodos tradicionais da Investigação Operacional, designadamente a Programação Linear, é o do sistema limitado com recursos conhecidos e finitos [2]. Ou seja, o problema de decisão desenvolve-se num quadro de restrições fixas. Eventuais análises de sensibilidade surgem como complementos de pormenor e de âmbito ou mesmo validade muito reduzida o que levava Beale[1] a considerá-las bem menos úteis na prática do que nos compêndios de Programação Matemática.

Ora, pelo contrário, os próximos anos tenderão certamente a fazer prevalecer a tese de [3] segundo a qual a organização é mais um operador de recursos externos do que dos seus próprios meios, ou seja, o problema de decisão deve formular-se num quadro aberto em que a generalidade dos meios de solução são negociáveis com o exterior mediante apropriadas funções de valor ou de preço, implícitas ou explícitas.

Esta linha de evolução suscitará certamente alterações profundas nos métodos de optimização que passarão a dar maior importância às situações de negociação ou jogo [6, 9] e bem assim à pesquisa de óptimos em espaços ilimitados. Esta atitude terá efeitos importantes não só no caso contínuo como também no domínio discreto onde serão necessários desenvolvimentos inovadores para espaços não descritos explicitamente.

1 referência feita pessoalmente ao autor.

2.3 Das escolhas uni-critério aos sistemas de preferência multi-critério

A generalidade dos métodos de Investigação Operacional baseia-se na hipótese de se poder escolher a decisão a tomar considerando um só critério o qual se pode exprimir por uma função real a maximizar ou minimizar.

É, hoje, evidente, ser esta formulação exageradamente simplista para muitos dos problemas de decisão a analisar.

Ora, uma das linhas recentes de desenvolvimento fecundo da Investigação Operacional é a da representação dos problemas de decisão em espaços multi-atributos pelo que não se duvida sobre o interesse da continuação destes desenvolvimentos disponibilizando-se um corpo metodológico que permita a formulação de preferências multi-dimensionais, a sua valoração e o seu tratamento com o objectivo de poder apoiar os responsáveis de tais problemas através de instrumentos práticos e eficientes (ver, por exemplo, [7, 10]).

A sua disponibilização nunca irá reduzir a importância da decisão mas, bem pelo contrário, dará maior relevância ao seu papel que passará a incluír a plena potenciação de tais sistemas de apoio à decisão. Estes contribuirão para a racionalidade do processo decisório através de funções múltiplas, designadamente:

a) Função semântica explicitando a escassez ou o excesso, o rigor ou a imprecisão das representações (modelos) do real estudado;
b) Função sintáctica, estabelecendo sistemas e quadros lógicos para o tratamento dos problemas representados;
c) Função integradora de contribuições especializadas disciplinares distintas tendo em vista a resolução dos problemas em estudo;
d) Função axiológica, revelando os sistema de valores ou critérios de escolha formulados;
e) Função interpelativa, contribuindo, através de modos interactivos, para a clarificação dos espaços menos racionalizados do próprio decisor;
f) Função inventiva, alargando os espaços das alternativas através das decomposições e reconstruções morfológicas mais adequadas;
g) Função harmonizadora, garantindo a estabilidade de princípios e de abordagens identificando eventuais incoerências e desvios aos quadros racionais escolhidos;
h) Função ética, explicitando contradições entre as acções empreendidas e as decisões escolhidas o que permite revelar subversões parciais ou completas dos sistemas de valores e critérios formulados.

Por fim convirá notar que as três grandes linhas de evolução aqui referidas aproximam bastante a Investigação Operacional do mundo dos problemas de Engenharia moderna. Na verdade, a necessidade de metodologias mais aperfeiçoadas para a simulação dos sistemas concebidos, projectados e executados, a possibilidade de desenvolver optimizações em sistemas abertos com maiores trocas com o exterior e, por último, a importância de dispôr de melhores apoios para a comparação de soluções alternativas são condições críticas para o desenvolvimento da Engenharia contemporânea não sendo difícil identificar a insuficiência de algumas destas condições como causa dominante dos fracassos ou menores sucessos que se verificaram na Engenharia durante os últimos anos.

Fracassos ou insucessos que motivam os nossos engenheiros a integrar cada vez mais - e desde a sua concepção - a obra a realizar nos espaços físico, cultural, social e económico que irão ser alterados pelo empreendimento que se realiza em termos de objectivos e efeitos, certamente múltiplos, na natureza dos benefícios e na diversidade dos utilizadores.

Referências

[1] Ackoff, R.L. e Sasiemi, M.W. (1968). *Fundamentals of Operations Research*, Wiley.

[2] Dantzig, G.B. (1963). *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press.

[3] Drucker, Peter F. (1964). *Managing for results*, Heinemann.

[4] Kaufmann, Arnold (1968). *The science of decision-making*, World University Liberary.

[5] Pugh, D.S., (1979). *Organization Theory*, Penguin.

[6] Raiffa, H., (1982). *The art and science of negutiation*, Harvard University Press.

[7] Roy, B., (1985). *Méthodologie multi-critére d'aide à la décision*, Economica.

[8] Tavares, L.V. e Nunes Correia, F., (1985). *Optimizar linear e não linear*, Fundação Calouste Gulbenkian.

[9] Tavares, L.V. e Santos, R. F. (1989). Conflict management in cooperative games: searching for consensus and convergence, *Operational Research and Social Sciences*, Plenum Press.

[10] Tavares, L.V. (1990). Un nouvean système relationnel de préférences multi-critère à transitivité généralizée: l'Hyper-Ordre, *Canadian Journal of Operational Research and Information Processing*, INFOR, **28**, 2, 125-142.

Sobre o Autor

Luís Valadares Tavares é Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

filtécnica

SALÃO INTERNACIONAL DOS EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, DA SUBCONTRATAÇÃO E DA MANUTENÇÃO

INTERNATIONAL EXHIBITION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT, SUBCONTRACTION AND MAINTENANCE

6/10 m_io

FEIRA INTERNACIONAL DE LISBOA
ASSOCIAÇÃO INDUSTRIAL PORTUGUESA

Sede: Praça das Indústrias, 1399 Lisboa Codex Telef. 362 01 30 Telex 12 282 FILEXP P Telefax 363 90 48
Delegação Norte: Rua Oliveira Monteiro, 453, 4000 Porto Telef. 69 92 36/69 92 46 Telegr FILNOR

A Telecom Portugal é a maior operadora portuguesa de telecomunicações, oferecendo a clientes nacionais e internacionais uma gama completa de serviços.

Quaisquer que sejam as suas necessidades em telecomunicações, no âmbito de redes privativas ou públicas, de circuitos alugados ou de serviços avançados, encontraremos e desenvolveremos as soluções mais eficientes e vantajosas.

TELECOM PORTUGAL

A ligação directa ao Séc. XXI

McCANN DIRECT

Há os que optam por um emprego.

os que têm fôlego para uma carreira.

Escolhemos gente certa para uma carreira certa. Gente objectiva mas, também, imaginativa. Que não se contente com o pouco.
Que não acredite na solução única.
Com conhecimentos suficientes para o desejo de estar sempre a aprender. Com a segurança que lhe permita ser flexível. E o fôlego que lhe garanta poder ir longe e mais longe.
A Andersen Consulting é uma empresa de Consultoria com experiência em várias áreas de actividade.
Integrando estratégia, pessoas e tecnologia.

O seu dia-a-dia de trabalho é feito de situações variadas.
De perfeita adequação ao caso de cada cliente.
A qualidade do seu trabalho só é possível com gente de qualidade.
O seu desenvolvimento só é possível com mais gente com as mesmas características.
Em quem apostamos com um programa de formação continuado nos Estados Unidos e na Europa. A quem proporcionamos não apenas um emprego mas uma ***carreira.***

ANDERSEN CONSULTING
ARTHUR ANDERSEN & CO., S.C.

Tudo começa aqui.

ANDERSEN CONSULTING
Amoreiras - Torre 1 - 16° - 1000 Lisboa

SIMAC
FILSOL

20/24 MAIO 92

9º SALÃO DA CONSTRUÇÃO E OBRAS PÚBLICAS
7º SALÃO INTERNACIONAL DAS ENERGIAS ALTERNATIVAS

9th BUILDING AND CONSTRUCTION EXHIBITION
7th INTERNATIONAL EXHIBITION OF ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY

Associação Industrial Portuguesa
Feira Internacional de Lisboa

Sede: Praça das Indústrias, 1399 Lisboa Codex Telef. 362 01 30 Telex 12 282 FILEXP P Telefax 363 90 48
Delegação Norte: Rua Oliveira Monteiro, 453, 4000 Porto Telef. 69 92 36/69 92 46 Telegr FILNOR
Telex 26 268 FILPOR P Telefax 6 49 82